Проф. Д. Б. ГИНЗБУРГ

☆

R 923/29

ГАЗИФИКАЦИЯ ТОПЛИВА И ГАЗОГЕНЕРАТОРНЫЕ УСТАНОВКИ

ЧАСТЬ I

Под редакцией
д-ра проф. Б. С. ШВЕЦОВА

☆

ОПЕЧАТКИ

Стр.	*Строка*	*Напечатано*	*Следует читать*
11, табл. 2	1 снизу	15,172	15172
графа 4	2 »	1,855	1855
	3 »	8,927	8927
12	3 сверху	Газ — в тыс. $м^3$	Газ — в млн. $м^3$
69	8 »	38,700	38700
69	10 »	32,360	32360
116	24 »	9899 кал.	9849 кал.
369	20 »	$p_a - p_e$	$p_a^2 - p_e^2$
369	22 »	0,908	0,808
369	24 »	в *м*	в *км*
369	25 »	в $м^3$	в $м^3$/*час*
446	13 снизу	(*H — 0,10*)	(*H — 0,1 O*)
564	23 сверху	стоимости	выгодности

Д. Б. Гинзбург. Зак. 1050.

Проф. Д. Б. ГИНЗБУРГ

☆

R 423
29

ГАЗИФИКАЦИЯ ТОПЛИВА И ГАЗОГЕНЕРАТОРНЫЕ УСТАНОВКИ

ЧАСТЬ I

Под редакцией
д-ра проф. Б. С. ШВЕЦОВА

☆

Утверждено ГУУЗ НКЛП СССР
в качестве учебника
для студентов втузов

☆

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ
И ДОПОЛНЕННОЕ

☆

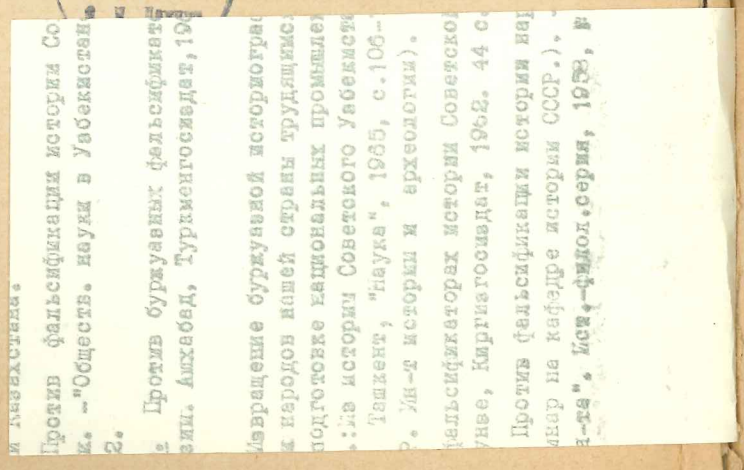
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
Москва — 1938 — Ленинград

Часть 1 книги «Газификация топлива и газогенераторные установки» является 2-м изданием и охватывает следующие разделы: развитие техники процесса газификации, теория и исследования процесса, конструкции и расчет газогенераторов и вспомогательного оборудования и свойства топлив. Настоящее 2-е издание является переработанным и дополненным и включает в себе новейший материал по теории и конструкциям.

Книга предназначена в качестве учебника для студентов втузов и для инженерно-технического производственного персонала заводов.

Всесоюзная библиотека имени В. И. Ленина





ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

☆

В народном хозяйстве СССР непрерывно расширяется применение генераторного газа как в промышленности для целей отопления, получения энергии и в качестве химического сырья, так и в быту. Интерес к генераторному газу все растет, и спрос на соответствующую литературу очень велик. Первое издание первой части книги «Газогенераторные установки» было распродано в короткий срок, и потребовался выпуск второго издания. Несмотря на то, что с момента выхода в свет первого издания прошло сравнительно мало времени, многое из изложенного оказалось необходимым коренным образом переработать.

В результате стахановского движения и развития техники производительность газогенераторов настолько возросла, что оказалось возможным опровергнуть многие господствовавшие ранее воззрения на процесс газификации. В свете достигнутых интенсивностей работы газогенераторов некоторые теории процесса газификации оказались неверными и консервативными. Одной из задач настоящей книги является разбор и критика фактов, на которых базировались эти теории, и обоснование как старыми, так и новыми данными современных взглядов на процесс газификации. Это потребовало приведения данных по большому количеству исследований.

В настоящем, втором издании расширен раздел «Физико-химические основы процесса газификации», приведены дополнительные данные по исследованиям процессов, связанных с газификацией, и обновлен и дополнен материал по конструкциям и работе газогенераторов и вспомогательного оборудования установок.

Автор полагает, что изложенные в книге материалы позволяют полностью опровергнуть неверное воззрение, что в современных газогенераторах процесс должен вестись при низких скоростях газового потока и в высоком слое топлива для обеспечения протекания восстановительных реакций, лимитирующих процесс.

Автор считает доказанным, что интенсивность работы современных газогенераторов может быть значительно увеличена.

Основным недостатком существующих типов газогенераторов является невысокая мощность отдельных агрегатов по сравнению с маштабами потребления газа в социалистическом народном хозяйстве.

Необходимость интенсификации работы существующих стационарных установок и создание новых конструкций мощных генераторов, развитие легких транспортных газогенераторов и крупнейшая

проблема подземной газификации угля, которая может быть разрешена только социалистической наукой и техникой, — требуют дальнейшего широкого развития научно-исследовательской работы в области газификации твердого топлива.

Сдвиг в направлении улучшения работы существующих газогенераторов и создание более мощных и совершенных конструкций наметился в последние годы в результате стахановской работы на газогенераторных станциях, проведения ряда теоретических исследований и научно-исследовательских и опытных производственных работ. В частности следует отметить работы по газогенераторам с кипящим слоем и взвешенным состоянием частиц топлива, по транспортным газогенераторам высокой удельной производительности и по подземной газификации угля.

Вместе с тем следует отметить, что достаточно обоснованной и признанной теории газификации еще не имеется, что в некоторой степени обусловлено сложностью процессов, протекающих при окислении углерода. Усилия научно-исследовательской мысли ряда стран направлены к исследованию этого процесса. Среди появившихся за последнее время работ наиболее ценными являются работы советских ученых, обосновывающие возможность огромной интенсификации процесса и создания сверхмощных газогенераторов. В ближайшее время следует ждать дальнейшего улучшения работы существующих газогенераторов, создания новых конструкций высокой производительности и широкого развития подземной газификации угля.

Книга является основным руководством по курсу, читаемому автором на силикатном факультете МХТИ им. Менделеева и на различных факультетах Московского института химического машиностроения, и для курсового и дипломного проектирования.

Для большего соответствия названия книги содержанию книга названа во втором издании «Газификация топлива и газогенераторные установки».

Автор приносит благодарность проф. Б. С. Швецову за редактирование настоящей книги, проф. Н. Н. Доброхотову, сделавшему ряд ценных указаний при просмотре рукописи, И. А. Смирновой, оказавшей помощь в оформлении книги, инж. К. С. Иванову, обработавшему некоторые материалы по конструкциям газогенераторов, и всем, указавшим автору на недочеты первого издания.

Автор обращается к читателям с просьбой сообщать о замеченных в книге погрешностях и недостатках.

☆

ВВЕДЕНИЕ

☆

1. ВИДЫ И КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИМЕНЯЕМЫХ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ

Из горючих газов широко применяются следующие: природный, генераторные, доменный, коксовальный, светильный, швельгаз и нефтяной газы. Подразделяя газообразное топливо на естественное и искусственное, к естественному следует отнести природный газ и к искусственному — все остальные.

Горючие газы классифицируют в зависимости от способа получения, теплотворной способности, назначения и происхождения.

В зависимости от способа получения различают: 1) газы сухой перегонки (твердых топлив), 2) генераторные газы (из твердых топлив), 3) газы из жидких горючих, 4) газы из негорючих материалов, 5) облагороженные газы и 6) естественный, или природный, газ.

По теплотворной способности различают газы с высокой и низкой теплотворной способностью (или богатые и бедные).

Эта классификация является очень условной и зависит от использования газа.

Точно так же условной является и классификация по назначению, ввиду возможности в большинстве случаев использования различных газов для одних и тех же нужд. По назначению учитывают: применение для целей отопления, освещения, силовых и бытовых нужд и в качестве химического сырья.

Иногда признаком для классификации является происхождение газа (дровяной, угольный, нефтяной, бензиновый). Обычно этот признак без дополнительных недостаточно характеризует газ.

Ниже рассматривается подробнее классификация по происхождению (отчасти) и способу получения.

1. Газы сухой перегонки получают при нагревании топлива без доступа воздуха в ретортных или камерных печах при высоких (светильный, коксовый) или низких (швельгаз) температурах. Эти газы характеризуются высоким содержанием углеводородов, значительным — водорода и малым — азота и кислородных соединений, а также высокой теплотворной способностью (3000—8000 *кал/м*³).

2. Генераторные газы получают путем воздействия кислородсодержащих газов (воздух, кислород, водяной пар, углекислота) на твердое топливо при высоких температурах (газификация). Эти газы получаются в газогенераторах и домнах. При газификации за счет дутья, богатого азотом (воздух, смесь воздуха, пара и угле-

кислоты), получаемый газ характеризуется высоким содержанием азота, переменным содержанием CO, CO_2 и H_2 и небольшим содержанием углеводородов (в случае выделения их из топлива при его нагревании). Теплотворная способность газа—низкая (700—1800 *кал/м³*). К этим газам относятся воздушный, смешанный (паровоздушный) и доменный газы.

При газификации за счет дутья, не содержащего азота или содержащего его мало, т. е. за счет водяного пара (водяной газ) или углекислоты (регенеративный газ), а также за счет кислорода (парокислородный и регенеративно-кислородный газы), получаемый газ богат водородом и окисью углерода или только окисью углерода (регенеративно-кислородный). В нем могут также содержаться продукты сухой перегонки топлива. Содержание азота в газе незначительно, за исключением случая пользования вместо чистого кислорода обогащенным кислородом воздухом. В газе также содержится некоторое количество углекислоты. При газификации под высоким давлением в газе может содержаться значительное количество метана. Теплотворная способность этих газов—2600—3000 *кал/м³* и выше.

3. Газы из жидких топлив получают путем испарения при низкой температуре летучих жидких горючих (бензин) или разложения при высокой температуре нелетучих жидких топлив (нефть, мазут, смолы, масла). В последнем случае газ называют нефтяным. Испарение и разложение жидких топлив могут протекать или самостоятельно или же в потоке других газов—воздуха (холодная карбюрация парами бензина или бензола) или генераторного газа (карбюрированный генераторный газ). Выделяющиеся при нагревании жидких топлив газы состоят преимущественно из газообразных углеводородов и небольших количеств H_2, CO и CO_2. Они имеют высокую теплотворную способность (4000—17 000 *кал/м³*).

Нефтяной газ получают в ретортах, нагреваемых снаружи, в камерах с разогретой насадкой и в трубчатых печах.

К этой же группе газов относится и блаугаз, представляющий собой фракцию тяжелых углеводородов из нефтяного газа, сжиженную при сравнительно небольшом давлении (100—200 *ат*). Блаугаз состоит главным образом из углеводородоз, а также из небольших количеств водорода, углекислоты, азота и кислорода. Теплотворная способность блаугаза —14 000—15 000 *кал/м³*.

4. Газы из негорючих материалов получают обычно в сравнительно небольших количествах из различных, преимущественно неорганических, веществ. Наиболее часто получают ацетилен воздействием воды на карбид кальция и водород электролизом воды, разложением воды раскаленным железом и взаимодействием при высокой температуре паров воды и паров фосфора, а также воздействием металлов на слабые растворы кислот и растворы едкого натра. Теплотворная способность ацетилена — 13 500 *кал/м³*, водорода — 2570 *кал/м³*.

5. Облагороженные газы получают путем выделения из смесей отдельных газов и обогащения смесей газов отдельными газами. К этой группе можно отнести например водород, получаемый путем сжижения или вымывания остальных, составляющих смесь

газов; отдельные фракции газов, например метановую или этиленовую, выделяемые из газа путем сжижения; обогащенные газы — путем например удаления промывкой под давлением углекислоты или путем увеличения или уменьшения содержания метана (при соответствующих температурах и наличии катализаторов).

Природный газ выделяется из земных недр преимущественно в местностях, где имеются месторождения нефти. Он является продуктом разложения растительных и животных остатков. Природный газ состоит главным образом из метана и других предельных углеводородов, а также обычно малых количеств углекислоты.

Данные о составе, выходах и теплотворной способности различных газов приведены в табл. 1.

2. ПРЕИМУЩЕСТВА ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА

Газообразное топливо имеет ряд преимуществ перед твердым и жидким.

Сжигание газа может быть с достаточной полнотой проведено при очень малом избытке воздуха, меньшем, чем при твердом и жидком топливе, и при этом могут быть достигнуты более высокая температура при горении и уменьшение потерь с отходящими газами, так как на нагревание избыточного воздуха затрачивается тепло, которое уносится вместе с воздухом из печи. Применение газа допускает легкую и лучшую, чем при твердом или жидком топливе, регулировку горения; при газовом топливе легко устроить автоматическое регулирование; применяя газ, можно придавать пламени требуемый для производства характер: окислительный — при большом избытке воздуха, восстановительный — при отсутствии кислорода и значительном содержании горючих частей в продуктах горения и нейтральный — при отсутствии значительных количеств кислорода и горючих частей в газах. Длину газового пламени можно регулировать в любых практических пределах. При требовании очень чистого пламени, без пыли, сажи и сернистых соединений, газообразное топливо, легко поддающееся очистке, может быть применено с бóльшим успехом, чем твердое и жидкое топливо.

Если имеется несколько потребителей газа, то топливное хозяйство можно централизовать и направлять получаемый из твердого топлива газ в различные места; это упрощает обслуживание и удешевляет тепловое оборудование. Иногда более выгодно взамен подвоза твердого топлива с места добычи к местам потребления получать из него газ на месте добычи топлива и транспортировать его на дальние расстояния, что освобождает потребителей от работы и расходов по доставке и хранению топлива, растопке, шуровке, чистке и от перебоев в работе.

При сжигании топлива с большим содержанием влаги нельзя получить высокие температуры, тогда как при сжигании газа, получаемого из этого топлива, вследствие возможности легкой его осушки эти температуры достижимы, что дает возможность применять низкосортные влажные топлива для получения высоких температур. Газ может быть предварительно подогрет, что связано как с получением

Выход и состав тех

нических газов

Таблица 1

Наименование процесса	Выхода (в весовых процентах)			Состав газа (в объемных процентах)								Высшая теплопроизводит. (в *кал/м³*)	Анализ топлива			Примечание
	газа	кокса или полукокса	смолы	CO_2	H_2S	O_2	C_mH_n	CO	CH_4	H_2	N_2		Влажность	Зольность	Высшая теплопр. (в *кал/кг*)	
Швелевание древесины (березы)	14,01	31,8	16,18	58,6	—	—	1,7	30,9	8,8	—	—	2044	8,79	0,32	4410	Перегонка в реторте при 420°
» торфа . .	70,9 *л/кг*	46.35	20,8	72,3	—	—	1,6	15,4	7,8	3,0	—	1558	—	—	5400	Перегонка в алюминиевой реторте при 450°
» подмосковного угля	4,78	50.78	5,03	20,3	9,3	—	1,3	19,8	31,2	18,2	—	4910	32,5	16,1	3400	
» челябинского »	10,00	59,62	5,29	19,7	1,7	—	1,4	16,4	39,8	18 0	3,0	5082	20,51	5,61	5364	Перегонка во вращающейся реторте при 500°, газ пересчитан на безазотный
» лисичанского »	60 *л/кг*	68,0	11,5	4,2	7,5	0,6	6,4	7,7	50,8	20,4	2,4	7165	7,15	7,10	7000	
Коксование каменного »	320 »	—	—	2	—	—	4,0	8	29	50	7	5160	—	—	—	
Получение водяного газа из кокса	1,75 *м³/кг*	—	—	7,0	—	—	—	40,9	0,8	48,5	2,9	2790	5,0	10,0	7000	
Получение карбюрированного водяного газа из кокса . .	—	—	—	5,3	—	—	9,2	29,7	13,9	36,2	6,2	4760	—	—	—	
Получение двойного водяного газа из буроугольн. брикетов	0,845 *м³/кг*	—	7,2	13,2	—	—	—	29,6	6,9	40,9	9,6	2805	11,2	9,80	5530	
Получение двойного карбюрированного газа из каменного угля	—	—	—	3,1	—	—	5,1	32,1	14,4	39,7	5,6	4354	—	—	—	
Получение нефтяного газа . .	0,6 *м³/кг*	—	—	2,0	—	0,1	6,0	5,3	40,4	41,4	4,8	6218	—	—	—	
Получение генераторного газа																
Из древесины: смешанного . .	1,31 *м³/кг*	—	78,7 *г/м³*	6,8	—	0,5	0,38	28,1	2,6	15,4	46,2	1630	30,0	0,53	3400	При работе на щепе
воздушного . .	—	—	—	5,6	—	—	0,3	29,4	3,0	12,7	49,1	1612	—	—	—	» » » поленьях
Из торфа: смешанного	1,53 *м³/кг*	—	46 *г/м³*	7,29	—	0,34	0,38	28,05	2,77	17,44	43,73	1698	27,1	3,46	3788	
воздушного	—	—	—	5,65	—	0,24	0,23	28,53	3,15	6,95	55,25	1414	22,85	2,01	—	
Из бурого угля (подмосковного) смешанного	1,2 *м³/кг*	—	36 *г/м³*	6,10	1,17	0.20	0,47	27,19	2,63	13,29	48,95	1646	28,33	21,59	3256	
Из каменного угля: смешанного	3,85 *м³/кг*	—	9,9 *г/м³*	6,5	—	0,2	0,5	23 6	2,8	13,9	52,6	1478	3,36	6,17	7458	
воздушного	—	—	—	7,3	—	0,1	0,3	21,0	2,2	9,0	60,1	1168	6,3	19,6	5700	
Из антрацита: смешанного . . .	4,4 *м³/кг*	—	—	6,6	—	0,1	0,2	22,5	0,9	14,5	55,2	1252	6,0	13,0	6600	
Получение газа из угля с разложением смол в генераторе для силовых нужд	5,18 *м³/кг*	—	—	8,6	—	—	—	18,3	0,6	14,0	58,5	1034	—	—	7250	
Получение генераторного газа Монда из торфа	1,4 *м³/кг*	—	4,4	18,4	—	0,10	0,25	11,40	3,30	23,30	43,05	1410	48,5	1,21	3284	
Получение доменного газа . .	—	—	—	8	—	—	—	28	—	4	60	672	—	—	—	
Получение газа на парокислородном дутье из буроугольного полукокса при нормальном давлении	2,59 *м³/кг*	—	—	25,5	—	0,1	0,2	21,0	1,8	51,4	—	2340	2,0	18,0	6600	
Получение очищенного газа на парокислородном дутье из буроугольного полукокса при нормальном давлении	1,99 *м³/кг*	—	—	3,0	—	0,1	0,3	27,3	2,3	66,8	—	3141	2,0	18,0	6600	
Получение газа на парокислородном дутье из буроугольного полукокса при давлении в 30 *ат*	1,41 *м³/кг*	—	—	38.2	—	0,1	0,9	10,9	12,7	37,2	—	2819	14,2	10,2	5405	
Природный газ (Даг-огни) . .	—	—	—	7,9	—	0,1	3,8	—	87,6	—	0,6	8960	—	—	—	

более высоких температур горения, так и с возможностью использования тепла отходящих газов печей и большей экономичностью последних.

Практически почти во всех случаях газ является тем видом топлива, которым наиболее легко и целесообразно заменить дефицитное жидкое топливо.

Во многих отраслях промышленности (стекольной, керамической, металлургической и др.) печи отапливаются преимущественно газообразным топливом. Большое распространение имеет также применение газа для бытовых нужд.

Газ является прекрасным топливом для сварки металлов. Газообразное топливо благодаря удобству использования газовой фазы в смысле взаимодействия с другими веществами и взаимодействия и разделения составляющих газов служит ценным сырьем для получения различных химических продуктов и топлив (синтез аммиака, метанола, бензина, производство водорода). Большое значение имеет также получение одновременно с газообразными топливами ценных побочных продуктов: смол, фенолов, уксусной кислоты, аммиака, серы и др.

В ряде случаев горючий газ является побочным продуктом наряду с другими, особенно при получении кокса.

Применение газа для отопления в большинстве случаев дешевле применения электрической энергии, несмотря на то что электрические печи дают более высокий к. п. д. [1] (газовые—18—40%, электрические—30—60% и больше); газовые печи обычно стоют дешевле электрических. Регулирование печей обоих типов может осуществляться одинаково успешно. Применение электрических печей может оказаться выгодным лишь при очень низкой стоимости энергии или в случае специальных требований, например в случае требования исключительно высоких температур (производство карбида кальция, карборунда и др).

3. РОЛЬ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА В ЭНЕРГЕТИКЕ

Источником энергии, необходимой в промышленности и в быту для получения движущей силы, тепла и света, является топливо и энергия ветра и падения воды. Энергия падения воды, а особенно ветра, составляет небольшую часть всей потребляемой энергии.

Соотношение мировых энергетических ресурсов по видам источников приведено в табл. 2 и 3 [44,46].

Первоначально применялись лишь наилучшие сорта топлива, для получения которых требовались незначительные усилия и которые содержали минимальное количество золы. Так с незапамятных времен применялись дровяное топливо и древесный уголь.

С исчерпанием в промышленных странах дровяных ресурсов началась добыча и использование ископаемых топлив и прежде всего наиболее ценных и легко используемых, в частности лучших сортов каменного угля.

Ограниченность ресурсов наиболее ценных и легко используемых топлив, а также развитие промышленности и повышение культур-

Таблица 2

Основные энергетические ресурсы крупнейших капиталистических стран и их использование

(По данным III мировой энергетической конференции 1936 г.)

(Данные относятся только к метрополиям)

Данные	Страны			
	США	Великобритания	Франция	Германия
Дата, на которую подсчитаны запасы	31/XII 1934	31/XII 1933	31/XII 1935	—
Каменный уголь (в млн. *т*)				
Запасы I	2 037 000	176 000	9 300	279 516 (1)
» II	Нет данных	129 500	4 250	80 445 (1)
Добыча	377 8 (2,3) / 381,2 (5)	225 (2) / 227 (5)	48,7 (2 4) / 47,1 (5)	124,8 (2)
Бурый уголь (в млн. *т*)				
Запасы I	Нет данных	Нет данных	Нет данных	56 758 (3)
» II	То же	(6)	То же	28 387 (3)
Добыча	» »	Нет	—	137,3 (2, 3)
Лигнит (в млн. *т*)				
Запасы I	852 000	Нет данных	170	—
» II	Нет данных	(6)	65	—
Добыча	2,3	Нет	—	—
Торф (в млн. *т*)				
Запасы I	13 380	(7)	Нет данных	10 000
» II	Нет данных	(7)	То же	Нет данных
Добыча	0,04 (2,8)	Незн.	Незн.	0,14 (2)
Нефть				
Запасы (в млн. *га*) I	(9)	Незн.	0,0035	Нет данных
» » II	2,0	То же	0,0030	То же
Добыча (в тыс. *кл*):				
сырая	158 037 (2)	140 (2)	78,1 (5) / 75,4 (5)	318 (2,11)
масла	Нет данных	Нет данных	5,5 (5) / 6,6 (5)	15 (2,11)
Газ естественный (в млн *м*³)				
Запасы I	Нет данных	Незн.	Нет данных	Незн.
» II	То же	То же	То же	То же
Добыча	50 111 (2)	Нет	» »	Нет данных
Газ искусственный (в млн *м*³)	19 393 (2)	13 419 (2)	» »	12 955 (2)
Энергия воды (в тыс. *квт*)				
Запасы	91 390	1 000	8,927	3 723,4
Добыча	11 208 (5)	293 (10)	1,855 (2)	1 260,4 (2)
Электроэнергия (в млн. *квт-ч*):				
Добыча	85 649 (2) / 93 526 (5)	15 462 (2) / 17 559 (5)	15,172 (2)	30 726 (2)

I—вероятные запасы, II—разведенные запасы

[1] Данные относятся к 1922 г.
[2] Данные за 1934 г.
[3] Вместе с лигнитом.
[4] Вместе с бурым углем и лигнитом.
[5] Данные за 1935 г.
[6] Имеются небольшие запасы, но не разрабатывались с 1918 г.
[7] Залежи занимают площадь в 24 350 *км*²; мощность составляет 1,5—9 *м*.
[8] Не является промышленным топливом.
[9] Вероятные запасы — 227 млн. *га*.
[10] Данные 1930 г.
[11] В тыс. *т*.

Таблица 3

Топливные ресурсы СССР

(Газ — в тыс. $м^3$, дрова — в тыс. $м^3$ и прочие виды топлива — в тыс. $т$)

Вид топлива	Всего	Всего в условном (7 000 *ал/кг*) топливе *	В том числе $A+B$	$A+B$ в условном топливе
Уголь	1 200 077 938	1 072 120 705	17 793 762	15 297 722
Нефть	2 995 786	4 280 000	212 462	315 000
Естественные газы . . .	985 860	1 410 000	61 921 642	88 700
Торф	95 500 000	47 750 000	13 182 040	6 591 020
Сланцы . . .	25 296 800	7 600 000	6 433 100	1 930 000
Дрова и отходы	20 300 449	3 819 000	20 300 449	3 819 000
Итого . .	—	1 136 979 705	—	28 041 442

* Перевод в условное топливо (кроме газа) произведен по коэфициентам, разработанным Комитетом по топливу при СТО.

ного уровня в странах, богатых малоценными топливами, побудили к изысканию способов использования для нужд промышленности и бытовых нужд менее ценных сортов ископаемых топлив. В то же время помимо непосредственного использования топлива совершенствовались методы переработки его с получением ряда ценных продуктов, используемых в качестве топлива, химикатов, смазочных масел и т. д. В настоящее время почти все виды естественных топлив подвергаются термической (пирогенетической) переработке, причем в зависимости от вида топлива и ведения температурного режима переработки получают различные продукты.

С глубокой древности производится пирогенетическая переработка древесины, вначале проводимая в кучах и с использованием только угля и небольшого количества смолы.

В настоящее время при углежжении лиственных пород получают древесный уголь, смолу, уксусную кислоту, метиловый спирт, ацетон, газ и другие продукты; углежжение хвойных пород дает также канифоль и скипидар.

При низкотемпературной перегонке торфа, угля и сланца получают первичную смолу, которая может быть переработана на ряд ценных химикатов (фенолы, парафины, воски) и жидкое моторное топливо, а также полукокс, используемый в качестве топлива, и высококалорийный газ.

Первые опыты полукоксования были произведены в середине XIX в. Значительное развитие получило полукоксование во время мировой войны 1914 г. в связи с выявившимся дефицитом жидких топлив.

При высокотемпературной перегонке топлив получают газ, смолу, бензол, аммиак, кокс, причем те или иные продукты приобретают основное значение в зависимости от назначения производства (в коксовальном производстве основной продукт — кокс, в газовом — газ).

Каменноугольный и торфяной кокс и древесный уголь используются главным образом в домнах для плавки чугуна.

Высокотемпературная переработка топлива (каменного угля) была начата еще в XVI в. с целью получения кокса для замены древесного угля в домнах, и только в XIX в. начали использовать получаемые при перегонке ценные побочные продукты—сначала газ, а потом смолу, аммиак, бензол и его гомологи.

При термической обработке нефтетоплива в зависимости от условий переработки получают легкое моторное топливо (крекинг-бензин), ароматику (бензол, толуол, ксилол), газ (нефтяной газ).

Цель крекинга нефтепродуктов — получение углеводородов с температурой кипения, соответствующей бензину, и повышение антидетонационных свойств бензина. Сырьем для крекинга служат: мазут, масла, газойль и т. д. В качестве побочного продукта получают нефтяной газ. Широкое развитие крекинг-процесс получил в 1915 г. в связи с дефицитом бензина. Рост автотракторной и авиационной промышленности вызвал огромный рост крекинг-установок.

В настоящее время распространен также пиролиз мазута, — разложение его при высоких температурах с целью получения нефтяного газа.

Газификация твердого топлива на первых этапах ее развития преследовала в основном цель использования газа для нужд освещения, отопления и сварки.

В настоящее время газификация твердого топлива дает газ для топливных, осветительных и силовых нужд и в качестве химического сырья для ряда синтезов; облагораживает малоценное твердое топливо, превращая его в высокоценный газ, и при этом позволяет получать ценные побочные продукты: смолы, уксусную кислоту, метиловый спирт, аммиак; генераторный газ не только заменяет жидкое топливо, но и сам является сырьем для изготовления жидкого топлива.

Вопрос о способе использования топлива решается на основе совокупности технико-экономических соображений.

При наличии природного газа другие газообразные топлива могут с ним конкурировать лишь при отдаленном расположении потребителей от источников газа.

При наличии в достаточном количестве отходов коксовального и полукоксовального производств в виде высококалорийного газа генераторный газ как специально получаемый является более дорогим. Однако генераторный газ имеет сравнительно с этими газами преимущество независимости получения. Так как количество коксовального и полукоксовального газов обычно недостаточно для покрытия потребностей в высококалорийном газе, то его используют для части потребителей, нуждающихся именно в высококалорийном газе, обслуживая остальных потребителей, в том числе и печи для коксования и полукоксования, генераторным газом.

Сравнительно со светильным газом преимущества генераторного газа состоят в меньшей стоимости и большей легкости и быстроте получения при необходимости покрытия пик нагрузок. Большим преимуществом генераторного газа является возможность его получения из любого твердого топлива.

В ряде случаев вопросы использования генераторного газа приходится рассматривать в совокупности и увязке с использованием других продуктов газификации и других газов.

Крупное промышленное строительство централизованного хозяйства и газификация целых районов характеризуется стремлением к наиболее рациональной переработке топлива, использованию местных топлив, максимальной замене нефтяного топлива другими и применению генераторного газа в комбинации с другими газами.

Генераторный газ можно смешивать с другими газами в целях достижения определенной теплотворной способности (дальняя газопередача, необходимость высоких температур горения) и состава (химическое сырье, скорость горения, желательная атмосфера), диктуемых технологическими требованиями потребления, или в целях получения наиболее дешевого газа, или в интересах транспорта, или же в интересах наилучшего комплексного разрешения ряда вопросов, связанных с получением и применением других топлив (отходы других производств в виде газов или остатков, которые могут быть газифицированы, периодичность потребления или получения газов).

Наиболее часто возникающие вопросы комбинированного использования различных газов связаны со следующими моментами. В коксовом и металлургическом производствах применяются отбросные газы в виде коксовального и доменного и в комбинации с ними или раздельно, в соответствии с условиями получения и нуждами потребления, используется генераторный газ. Для бытовых и других нужд, целей синтеза и т. п. используются смеси коксовального, светильного и водяного газов или смеси генераторного газа с нефтяным, специально получаемым (карбюрация) или являющимся отходом других производств. В качестве химического сырья для целей синтеза аммиака применяются смеси водяного и смешанного газов определенного состава. При дальней передаче газа, имеющего определенную теплотворную способность, естественный газ смешивается с генераторным. При строительстве газоцентралей, в которых разрешается комплексная задача наиболее целесообразной переработки местных топлив и снабжения газом разнородных потребителей, в том числе и дальних, топливо может подвергаться или газификации или швелеванию и коксованию; получаемый полукокс или кокс также может подвергаться газификации; самая газоцентраль обычно является потребителем низкокалорийного газа, и в результате в подобных газоцентралях могут получаться различные виды генераторного газа, применяемые как раздельно, так и в смесях с другими.

4. КРАТКИЙ ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР РАЗВИТИЯ ТЕХНИКИ ПРОИЗВОДСТВА ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА

Первые опыты получения генераторного газа

Возможность получения газообразного топлива — генераторного газа — путем газификации твердого топлива была установлена сравнительно задолго до промышленного его использования. Потребовался определенный уровень развития техники, чтобы применение генераторного газа стало рентабельным и обеспечило в свою очередь совершенствование технических процессов.

Первая попытка применения газообразного горючего в заводском деле приписывается Оберто (Франция, 1809—1811), который использовал доменные газы для обжига известняка. Эта попытка вызвала много подражаний, но на применение доменных газов в качестве топлива серьезное внимание было обращено лишь к сороковым годам прошлого столетия в связи с работами в металлургической промышленности над газовым отоплением печей, когда Фабер-де-Фор (Германия, 1832—1837) использовал доменные газы для отопления сварочных и пудлинговых печей.

Успешное использование доменного газа побудило к самостоятельному, не зависимому от выплавки чугуна получению газа, и уже в 1840 г. начала работать томильная печь на смеси доменного и генераторного газов, и Фабер-де-Фор провел опыты газификации каменного угля и торфа низкого качества — топлив, в обычных домнах и других печах не применявшихся.

В 1839 г. Бишофом, которому некоторые приписывают сооружение первого газогенератора, был предложен газогенератор с горизонтальной или несколько наклонной плоской колосниковой решеткой, работавший на торфе с удалением золы в твердом виде и обслуживавший сварочную печь.

В этот же период во Франции были построены генераторы Лораном и Тома и позднее Эбельманом (1841—1851), с именем которого связаны дальнейшие усовершенствования в этой области.

В 1842 г. Эбельман успешно газифицировал в генераторах с жидким шлакоудалением вначале древесный уголь, а позднее кокс. В качестве дутья применялись воздух и паровоздушная смесь.

Возможность разложения водяного пара коксом и получения водяного газа была установлена Фелисом Фонтана, когда еще не было известно применение светильного газа, а именно в 1780 г. Происходящий при этом процесс уяснен не был.

В 1783—1784 гг. Лавуазье провел опыты по разложению водяных паров с целью получения водорода и указал на возможность технического использования процесса для получения водорода. Однако только в 1830 г. Доновану в Дублине удалось практически использовать водяной газ, полученный при подаче водяного пара в слой кокса, нагретого в реторте.

Развитие техники производства водяного газа было тесно связано с техникой производства светильного газа, и от последнего были заимствованы вначале горизонтальные, а позднее вертикальные обогреваемые снаружи реторты.

Водяной газ, получаемый в реторте, был использован для освещения города Нарбонны в 1856 г. Однако получение газа в ретортах с внешним обогревом было слишком дорого.

Получение водяного газа в генераторе с попеременным вдуванием воздуха и пара было осуществлено Киркгамами в 1854 г. Комбинацией двух генераторов они добились равномерной подачи газа в сеть. В 1859 г. реторта в Нарбонне была заменена генератором водяного газа.

Иобард и Зелиге карбюрировали водяной газ путем превращения в газ минеральных масел и примешивания этого газа к водяному.

Практическое применение воздушного и смешанного генераторных газов

Первоначально воздушный и смешанный генераторные газы применялись только для целей отопления печей; в настоящее время они также используются преимущественно для этих же нужд, причем ряд вновь развившихся отраслей промышленности стал базироваться на генераторном газе как основном топливе. Толчок этому дал выявившийся еще во время мировой войны дефицит жидкого топлива.

Значительное распространение эти газы получили также в качестве силового газа.

В текущем столетии воздушный и смешанный газы стали применяться в качестве химического сырья: до войны — главным образом для улавливания из них аммиака, а в последние годы — в качестве источников азота, окиси углерода и водорода (синтез аммиака, восстановительные процессы и т. д.).

Первый этап развития газогенераторов. Особые заслуги в части введения газового отопления печей принадлежат братьям Сименс, применившим генераторы с естественной тягой[1] и ступенчатой решеткой и изобретшим регенеративные печи.

Пользование естественной тягой позволило отказаться от применения при работе генератора двигателей, установка которых по тому времени была затруднительна. Введение пара в генераторах Сименса осуществлялось путем заливания водой поддувала. Лишь через значительный промежуток времени, с применением вначале паровых инжекторов (предложены Пфейфером в 1880 г.), а позднее центробежных вентиляторов с приводом от мотора или паровой турбины, самодувные генераторы уступили место генераторам с дутьем.

Предложенное Сименсом (1882) введение подогретого дутья с использованием для подогрева дутья физического тепла газа впоследствии было реализовано в установках Монда и в генераторах с жидким шлакоудалением.

Особенно важным в предложениях Сименса явилось сочетание газового отопления с устройством регенераторов (1861).

С этого времени генераторный газ распространился в качестве топлива особенно широко в стекольной, металлургической и керамической промышленности для основных процессов: варки, обработки и отжига стекла, плавки и нагрева металла, обжига изделий и глины и т. д.

---

[1] Сименсы вполне сознавали причины, управляющие движением газов, и располагали генераторы с естественной тягой возможно ниже.

При невозможности заглубления генераторов Сименсы сооружали длинный коленчатый газопровод с кирпичной частью (малая потеря тепла, малый удельный вес газов) для подъема газа и железной горизонтальной и опускной частью (большая отдача тепла наружу, больший удельный вес газов). Больший удельный вес газов в опускающейся ветви газопровода обусловливал создание напора, необходимого для преодоления сопротивлений (сифон Сименса).

Уже в конце 1877 г. из 600 стекловаренных печей в Германии 336 работали с газовым отоплением.

Развитие газогенераторов на паровоздушном дутье. Введение паровоздушного дутья усовершенствовало процесс газификации. Уменьшение теплосодержания (меньшие потери при охлаждении) позволило подавать газ на большое расстояние, а также применить мокрую очистку газа.

Паровоздушное дутье предлагалось еще Эбельманом, однако впервые смешанный газ был введен в широкую практику Даусоном в 1883 г., использовавшим этот газ для силовых нужд. Этот газ называли даусоновым, полуводяным и силовым.

Газовые двигатели внутреннего сгорания — газомоторы — стали применять с 1860 г. (французский завод Хугон). Вначале в них применялся светильный газ, впоследствии—генераторный.

Даусон предложил практически пригодную и экономичную аппаратуру для получения силового газа: водяной кожух, испаритель, обогреваемый газом, гидравлический затвор с погружением поверхностей, газометр для регулирования давления.

Бенье (1892) предложил отсасывать газы из генератора, что позволило при получении силового газа отказаться от газометра.

При обслуживании печей применялись генераторы с дутьем: первоначально с помощью инжекторов, а позднее — вентиляторов.

Развитие генераторов с жидким шлакоудалением. Генераторы с выпуском жидкого шлака, являющиеся самой старой конструкцией, долгое время не внедрялись в широкую практику вследствие легкого застывания шлака, сильного резъедания футеровки и большого уноса пыли. Периодически эти генераторы вновь предлагались с известными усовершенствованиями или изменениями. Возникшие в последние годы проблемы создания конструкций большой производительности, использования топлив с легкоплавкой золой, получения газа с высокой теплотворной способностью на дутье с высоким содержанием кислорода или газа с малым содержанием водорода и сероводорода, наряду с большими усовершенствованиями генераторов, связанными с применением сильно подогретого дутья и использованием побочных продуктов (качественные чугуны, возгоняющиеся металлы, шлак), побуждают к применению генераторов с жидким шлакоудалением. В этих генераторах предусматривается получение или воздушного и смешанного газов (отопительный газ, химическое сырье), или — при дутье с высоким содержанием кислорода и углекислоты — газа, богатого окисью углерода (химическое сырье), или — при парокислородном дутье — высококалорийного газа (отопительный газ, химическое сырье).

Первые генераторы с жидким шлакоудалением (строившиеся по подобию домен) были сконструированы Эбельманом в 1841 г. (в Одинкуре), однако прошел значительный промежуток времени, пока эта конструкция получила признание. В период 1880—1906 гг. в разных местах делались попытки использования этих генераторов: в 1880—1890 гг. — в Витковичах (Германия), в 1881 г. — генератор Тэйлора на антраците в Честере (Америка), в 1906 г. в целях получения сило-

вого газа с малым содержанием водорода — генератор Твайта на коксе и ланкаширском угле в Англии.

В 1907 г. усовершенствованные генераторы с жидким шлакоудалением были сооружены французской фирмой «Fichet & Heurtey» совместно с M. Sepulchre (генераторы S. F. H.).

Значительное применение генераторы с жидким шлакоудалением получили в Германии во время мировой войны (генераторы Вюрта, Георгс-Мариенхютте, Ремана и Пинча).

Впоследствии применение сильно подогретого дутья позволило избежать основного затруднения, свойственного генераторам с жидким шлакоудалением, — трудности поддержания шлака в текучем состоянии. В этих генераторах стали предусматривать использование побочных продуктов (установка в Сент-Этьене с 1920 г.; получение Филипоном и Дессемондом патента на применение сильно подогретого воздушного дутья для газификации низкосортного топлива с одновременным получением чугуна и шлака, годного для приготовления цемента; строительство таких генераторов фирмой «L'air Chaud» в 1926 г. в Сент-Этьене; использование в 1927 г. генераторов с жидким шлакоудалением фирмами «Fusion et Voltisation» и «L'air Chaud» для возгонки и улавливания металлов — цинка, свинца и др.).

Развитие приспособлений для удаления золы и шлака в твердом виде и для распределения дутья. Развитие генераторов в значительной мере связано с усовершенствованием приспособлений для удаления золы и шлака и распределения дутья.

Ручное золоудаление при естественной тяге или примитивно устроенном сухом уплотнении и плохом распределении дутья определяло малый масштаб, трудность обслуживания и недостаточно удовлетворительную работу генераторов.

Применявшаяся в первых генераторах преимущественно горизонтальная или слегка наклонная решетка не могла в достаточной мере удовлетворять требованиям техники. Еще Бишоф предлагал установку плоских решеток под углом, обеспечивающим расположение топлива слоем небольшой постоянной высоты.

Сименс значительно улучшил условия работы и обслуживания, применив ступенчатые решетки и перегородки в шахте, позволяющие поддерживать постоянной высоту слоя топлива и облегчившие разламывание и удаление шлака. И в дальнейшем много усилий и попыток делалось для улучшения условий удаления золы и шлака и распределения дутья (Лигель, 1877 г. и Цан, 1885 г.,— безрешеточный генератор с суживающейся книзу шахтой; Брук и Вильсон — безрешеточный генератор с подачей дутья через дутьевые коробки с отверстиями; Вильсон, 1882 г., — гидравлический затвор для удаления золы на ходу и дутьевой колпак, впоследствии замененный решетчатой коробкой; Дуфф — гидравлический затвор и седловидная решетка).

Большим усовершенствованием явилось позднее применение круглых генераторов с центральной подачей дутья, более равномерным распределением дутья и с гидравлическим затвором, позволившим удалять остатки без перерыва в работе генератора. Из последних конструкций особенное распространение получила конструкция Моргана с центральным дутьевым колпаком и гидравлическим затвором (Англия, 1896), позволившая значительно улучшить режим и повысить производительность генератора.

Впоследствии стали применять и другие типы решеток для ручного золоудаления, обладающие теми или иными достоинствами (решетка «Дахрост» с сухим уплотнением).

Развитие механического удаления золы и шлака шло сравнительно медленно (Зикель, 1877 г., и Геринг, 1879 г., — шнеки для удаления золы; Гребе, 1878 г., — ступенчатая передвижная решетка; Меллер, 1878 г., — подвижная решетка; Брук, 1884 г., и Тейлор, 1889 г., — вращающаяся зольная тарелка с дутьевым колпаком; Гонкрафт, 1889 г., Кетхум, 1893 г. и Китсон, 1893 г., — вращающийся поддон, удаляющий шлак и распределяющий дутье; Мюллер, 1895 г., — вращающийся побудитель для золы в комбинации с коническим подом, с дутьевыми каналами и открывающейся для удаления золы нижней частью шахты).

Значительно приблизился к современным приспособлениям де-Лаваль (1896), применивший для удаления золы вращающуюся решетку из плитчатых колосников уменьшающегося диаметра, лежащих друг над другом и снабженных горизонтальными дутьевыми канальцами. В 1900 г. Керпели применил решетку из одной плиты и нижнего размалывающего кольца значительной высоты в комбинации с гидравлическим затвором. При работе решетки наблюдались сильный износ ее и плохое распределение дутья. Только соединение решетки с вращающейся чашей (1902—1904), разрешившее одновременно с механизацией золоудаления вопрос хорошего распределения дутья и улучшения режима, позволило освоить тип генератора с механическим золоудалением. Следует впрочем отметить, что в Америке еще до 1898 г. Юз применил механическое удаление золы.

Удачное завершение Керпели работ по механизации удаления золы и шлака дало сильный толчок развитию генераторов, позволило в значительной мере улучшить их работу и перейти к генераторам сравнительно большой производительности.

В связи с необходимостью поддерживать в генераторах повышенное давление (решетка Керпели и другие с мелкими отверстиями для мелкозернистого топлива, генераторы водяного газа) или же в силу соответствующих свойств золы стали применять также сухое уплотнение генератора.

Почти все существующие в генераторах обычных размеров механические решетки в той или иной степени подобны решетке Керпели, и лишь в отдельных случаях решетки имеют в корне отличающуюся конструкцию (решетка Геца с вращающимся брусом и неподвижной горизонтальной решеткой, качающаяся решетка Смита и т. д).

В генераторах большого диаметра применяются или предлагаются для них решетки других типов: кольцевые, кольцевые в комбинации с центральными и с образованием промежуточной кольцевой щели.

В отдельных случаях вращающиеся решетки заменяют шиберами, удаляющими золу из отдельных частей генератора (генератор Ричи-Гоцо), а также применяют вращающиеся скребки в комбинации со шнеками (генератор Винклера) и т. д.

Совершенствование устройства шахт. Совершенствование устройства шахт шло по пути замены кирпичной кладки металлом и в местах, подверженных разъеданию шлаком или привариванию его, — поверхностями охлаждения. Искусственное охлаждение шахт применялось также в целях получения пара или подогретой воды в самом газогенераторе.

Попытки замены металлических кожухов железобетонными (генератор Verity) в целях экономии металла распространения не получили.

Устройство шахт претерпевало значительные изменения в связи с их приспособлением к способу удаления шлака (вращающаяся чаша или поддон и решетка, отверстия для удаления шлака), подвода дутья (открытое или закрытое поддувало, сухой или гидравлический затвор) и шуровки (вращающиеся шахты).

Во избежание пропуска газа отверстия в шахтах стали снабжать специальными плотными шуровочными затворами и паровыми и воздушными завесами.

Развитие приспособлений для получения пара в газогенераторах. Получение пара в газогенераторах было обусловлено потребностью в паре для дутья и других нужд и нежелательностью сооружения специальных котельных, что имело особенное значение в малых установках, а также целесообразностью использования тепла, теряющегося при охлаждении генератора, в целях уменьшения шлакования.

В установках силового газа особенное значение придавали не столько борьбе со шлакованием, сколько получению пара как экономическому фактору, так как в силу обычной прерывности производства в установках силового газа шлакование имеет меньшее значение. Именно в установках для получения силового газа нашло широкое применение использование физического тепла газа. Меллер (1879) предложил охлаждающий кожух для верхней части генератора, в котором подогревался воздух или получался пар, Каундт (1881) — наружное охлаждение кладки в местах шлакования; позднее в местах шлакования обмуровку заменили поверхностями охлаждения.

Маришка (1911) установил генератор-котел, внутри шахты которого расположил барабанный паровой котел. Впоследствии Маришка и др. стали внутри шахт устанавливать экранные котлы.

Развитие загрузочных приспособлений. Недостатки первоначально применявшихся ручных загрузочных приспособлений заключались, помимо необходимости в ручном обслуживании, в недостаточной плотности и неудовлетворительном распределении топлива. Совершенствование их шло в направлении перехода к непрерывной механизированной подаче топлива.

Устройство камер, заполненных топливом, обеспечивало непрерывную подачу топлива и поддержание постоянного слоя топлива и состава газа; однако все же оставались необходимыми ручные засыпка топлива и шуровка.

Для лучшей плотности загрузочных приспособлений, а также для лучшего распределения топлива по сечению стали применять конические клапаны (одинарные и двойные), гидравлические затворы и паровые завесы.

Механизация загрузки топлива в газогенераторы была впервые введена шведским инженером Бильдтом (1893); поздней эта конструкция была вытеснена загрузочным аппаратом Джорджа (1903).

Впоследствии было предложено большое количество разнообразных автоматических питателей, из которых наибольшее распространение получили барабанные питатели. Эти питатели применяются и в комбинации с автоматическими шуровочными приспособлениями (Чапмана, Вельмана).

Недостаточная плотность барабанных питателей побудила к замене их в генераторах водяного газа питателями с промежуточными бункерами или с коническими клапанами (питатель Говарда). В последние годы наблюдается замена барабанных питателей коническими и в обыкновенных генераторах (Вельмана).

В новейшей конструкции генератора для мелкого неспекающегося топлива (генератор Вельман — Галуша) автоматический питатель заменен питающими рукавами, связанными с бункерами для топлива и подающими топливо в нескольких участках сечения.

Развитие автоматической шуровки. Наряду со стремлением механизировать и сделать непрерывным золоудаление изыскивались пути механизации шуровки, что преследовало цели освобождения персонала от тяжелой работы, достижения равномерности режима, увеличения производительности установки и применения более спекающихся топлив.

Тальбот (1897) применил охлаждаемую водой вертикальную вращающуюся ось, снабженную отростками для шуровки шлака и топлива.

Тальбот (Англия), а также Юз (Америка, 1897) для перемешивания топлива использовали вращение шахты; Дуфф (1901) предложил многоугольную вращающуюся шахту.

Американские конструкторы с 1905 г. стали широко использовать (преимущественно для спекающихся топлив) вращающуюся шахту в комбинации с дополнительными автоматическими шуровочными и питательными приспособлениями.

До этого времени в Америке вращающиеся решетки внедрялись медленно ввиду того, что применявшиеся каменные угли были дешевы и хороши, потеря горючего в шлаке не имела существенного значения, а при наличии неквалифицированной рабочей силы имелась угроза сжигания решетки.

Применение механических генераторов, особенно пригодных для каменного угля, позволило свести к минимуму рабочую силу, и именно в связи с этим в Америке при дорого стоящей рабочей силе наиболее широко распространились газогенераторы с автоматическими шуровочными приспособлениями.

Распространение получила преимущественно конструкция типа Юза (вращающаяся шахта и движущийся лом). Развились также конструкции с вращающимися мешалками (Чапмана), планирующими устройствами и др.

В Америке уже до мировой войны 70% всех газогенераторов были механическими.

Развитие техники процесса в направлении использования топлива. Параллельно с совершенствованием конструкций газогенераторов газификации подвергалось все большее число видов топлива, повышался коэфициент полезного действия установок и улучшалось использование топлива в смысле получения нужных продуктов: бессмольного газа, повышенного качества газа и смол, аммиака, уксусной кислоты и т. д.

Одновременно улучшалась и подготовка топлива для газификации: сортировка на куски определенного размера, подсушка, брикетирование.

Наконец следует отметить проблему огромной важности, разрешаемую в настоящее время, — газификацию топлива в местах залегания, т. е. подземную газификацию угольных пластов. Работы в этом направлении проводятся в СССР.

Большая работа была проведена в направлении изыскания методов использования дешевого мелкозернистого и пылевидного топлива, имеющегося в больших количествах.

Тимм предложил сжигать пыль во вращающейся печи с пылеугольной топкой и восстанавливать получившуюся углекислоту при движении газов через слой топлива. Маркони предложил сжигать пыль в специальной топке и продукты горения отводить через обычную шахту.

Хирт сконструировал генератор в виде высокой кольцевой камеры, в которую снизу вдувалась тангенциально смесь воздуха и пыли. Состав газа сильно колебался.

Проблема практического использования в генераторах мелких топлив была разрешена с изобретением Винклером генератора для газификации топлива в токе интенсивно движущихся газов или во взвешенном состоянии. Одновременно Винклером была решена задача создания генератора большой производительности. Широкое распространение генераторов Винклера повидимому является вопросом недалекого будущего.

Еще Эбельман (1843) установил, что при пропускании смолистого газа через раскаленный слой топлива смолы разлагаются, и предложил генератор с обращенным движением газов. Однако вопросы применения бессмольного и очищенного газа были разрешены лишь в связи с необходимостью снабжения газомоторов очищенным газом.

Вначале для получения силового газа применяли топлива, бедные летучими: антрацит и кокс; потом стали предлагать и применять конструкции для битуминозных топлив: с отводом газа в середине слоя (Сименс, 1864), с подводом дутья вверху (Горман, 1877) и с двойным подводом дутья и вверху и внизу. Незе (1878) было предложено подавать дестилляционные газы по специальным каналам в раскаленную зону и отводить генераторный газ снизу. Брукман (1879) предложил примешивать к воздушному дутью газы сухой перегонки. Ольшевский (1880) предложил применять средний отвод газа и газы сухой перегонки примешивать к инжектирующему их воздушному дутью. Рише, Твайтом и фирмой «Дейц» были использованы сдвоенные генераторы таким образом, чтобы смолистый газ из одного генератора проходил через раскаленный слой кокса или древесного

угля другого генератора снизу вверх или через слой смолистого топлива сверху вниз (Твайт).

В настоящее время в малых установках стационарного и особенно транспортного типа получили распространение генераторы с обращенным движением газов, в больших установках — двухзонные (преимущественно) и сдвоенные.

Эти предложения применительно к питанию печных установок реализованы не были вследствие понижения теплотворной способности газа, уменьшения его излучаемости и нечувствительности обычных печей к загрязненности газа смолистыми веществами. Некоторое развитие имела сформулированная В. Сименсом идея регенерирования продуктов горения газов сухой перегонки и отходящих газов печей, впоследствии реализованная в смысле получения регенеративного газа путем использования углекислоты (собственно предложение регенерирования углекислоты принадлежало сотрудникам фирмы «Сименс» Бидерман и Харвей). Регенерирование CO_2 позволяет также улучшить состав газов, богатых CO_2, например доменного. Это особенно рекомендовалось Эренвертом и Ф. Лерманом (младшим).

Улавливание аммиака из генераторного газа имело значение в связи с соответствующими требованиями сельского хозяйства.

В 1883 г. Монд (Англия) предложил, а в 1889 г. осуществил газогенераторную установку с улавливанием аммиака и с введением в генератор больших количеств пара. Для нагревания дутья и получения пара Монд использовал физическое тепло газов.

Франк и Каро (1911) усовершенствовали способ Монда, распространив его на очень влажные топлива (торф, бурые угли), что удалось при подогреве паровоздушной смеси до 300° (с помощью специальных топок). Получаемый газ использовался для силовых нужд. В настоящее время способ Монда вытеснен синтетическими методами.

Смола вначале рассматривалась как бесполезный продукт, и конструктивное выделение в генераторах зоны сухой перегонки имело целью главным образом разложение смолистых веществ. Улавливание смолы приобрело значение вследствие большой потребности в ней, возникшей в период войны (смоляное масло для двигателей и промышленности).

Около 1900 г. Томсон предложил генератор с ретортой и раздельными отводами газов швелевания и генераторного. В 1914 г. Гарлен предложил швельшахту, омываемую газами снаружи.

Стремления к получению при газификации первичных смол, особенно проявившиеся в Германии в период войны, привели к созданию генераторов со швельшахтами с двумя отъемами газов (Пинч — для сухих топлив) и с одним отъемом (A. V. G. — для влажных топлив), а иногда с отделением слоя топлива в швельшахте от слоя топлива в нижней шахте. От генераторов с внутренними камерами отказались.

В качестве аппаратов для очистки газа от смолы до 1925 г. применялись преимущественно дезинтеграторы. Впервые эти аппараты были предложены Брауном (1877) и затем усовершенствованы Тейсеном, Шварцем, Динглером, Цшоке и др.

В настоящее время дезинтеграторы в больших установках вытесняются электрофильтрами (аппараты Коттреля) — аппаратами, введенными в практику очистки газов в 1908 г., усовершенствованными рядом заграничных фирм и получившими особенное распространение с 20-х годов. Преимущество этих аппаратов заключается в малом расходе энергии на очистку газа.

Улавливание при газификации древесины и торфа уксусной кислоты на некоторых новейших заводах СССР начато с 1930 г., причем используются методы, применяющиеся при сухой перегонке древесины.

Первоначально очистка газа от сероводорода производилась в ящиках, наполненных очистным материалом, причем выделяющаяся сера не использовалась. Очистка газа в ящиках применяется свыше ста лет. Изменения, происшедшие за это время, касаются конструкции ящиков и рода очистных материалов. Сначала применялась гашеная известь. В 40-х годах прошлого столетия начали применять гидрат окиси железа. Нерегенерируемая гашеная известь и в настоящее время иногда применяется в малых установках для поглощения CS_2. В 900-х годах сухая очистка была усовершенствована путем добавления перед очисткой к газу воздуха.

Выгоды получения серы в чистом виде побудили к разработке способа очистки газа от сероводорода с помощью активированного угля с последующим извлечением серы. Подобная установка была пущена в 1926 г. в Германии, и затем этот способ был использован обществом «I. G. Farbenindustrie».

Предложено также вести сухую очистку газа в башенных конструкциях, а также применять очистный материал в виде пыли.

Англичане Вельтон и Девис предложили взамен сухой мокрую очистку газа путем промывки его щелочными растворами.

Способ мокрой очистки газа от сероводорода без улавливания серы был впервые применен в 1920 г. компанией «Копперс» для очистки газа коксовых печей общества «Seabord By Product Coke Co» в г. Джерсей (США) и получил название способа Сиборда.

Мокрые способы очистки получили промышленное применение после предложения голландцем Пти дешевого способа регенерации отработанного раствора. Усовершенствование способов мокрой очистки газа облегчило в дальнейшем применение сероочистки для генераторного газа.

Способ «Феррокс» (железо-содовый) был разработан Манном и Лебо, способ «Тайлокс» — фирмой «Копперс» (Питтсбург).

В последее время применяют также очистку газа от сероводорода и углекислоты при помощи растворов этаноламинов.

В СССР из мокрых способов очистки генераторного газа нашли применение с 1931 г. способы Сиборда, железо-содовый и мышьяковый.

Практическое применение высококалорийного газа

Развитие методов использования водяного газа. Первоначально водяной газ применялся для целей освещения и в отдельных производственных процессах, где требовались высокие температуры пламени.

В США условия использования водяного газа были особенно благоприятны ввиду наличия большого количества антрацитов и нефти и меньшей стоимости водяного карбюрированного газа сравнительно со светильным газом. В 1871 г. Лове (Америка) построил установку для получения водяного карбюрированного газа для освещения города Фениксвилле. 25 лет спустя уже $^2/_3$ всех газовых установок производили водяной газ. Установка Лове была усовершенствована Грангером и получила широкое распространение в Америке.

В Европе условия рынка были не столь благоприятны, и установки внедрялись медленнее. Решающее значение имело применение газа для целей нагревания в промышленных установках, где требуется высокая температура пламени (сварка, обработка стекла, различные нагревательные аппараты).

Для целей сварки были построены большие установки «Europäische Wassergas — A. G.» (E. W. — A. G). Опыт использования водяного газа для отопления мартеновских печей в Витковичах не удался, так как кладка печей не выдерживала развивавшихся высоких температур.

Водяной газ для целей освещения получил особенно широкое распространение после изобретения Ауэром колпачков накаливания из окислов редких элементов.

Освещение путем накала водяным газом затруднялось вследствие окрашивания колпачков осаждающейся окисью железа и засорения горелок соединениями железа и кремнекислотой, содержащимися в водяном газе. Недостатком являлось также то, что водяной газ не имеет запаха и трудно заметить неполноту горения, что влекло за собой отравления.

Штрахе удалял соединения железа с помощью серной кислоты и кремнекислоту (тонкая пыль) — путем фильтрации через мелкие опилки, что способствовало распространению конструкции Штрахе.

Для одоризации газа прибавляли вначале меркаптаны (C_2H_5SH), а позднее — карбиламин (C_6H_5HC).

Особые заслуги в области применения водяного газа в Европе имеет фирма «Дельвик», которая первая использовала некарбюрированный газ для промышленных нужд.

Опыты Дельвика были дополнены Флейшером.

Карбюрированный газ в Европе стали применять как примесь к светильному газу, а также для промышленных целей — для сварки, обработки стекла, отопления и т. д. К моменту распространения установок Дельвика — Флейшера и Штрахе фирма «Гумфрей и Глазго» начала внедрять уже распространенное в Америке производство водяного карбюрированного газа. Эта фирма ввела попеременное газование. Позднее Даннерт расположил карбюратор в генераторе.

В результате войны производство карбюрированного маслами газа в некоторых европейских странах (Германия) уменьшилось, и только в последнее время это положение стало изменяться в связи с удачным завершением опытов по карбюрации газа буроугольной и каменноугольной смолой.

В период 1910—1920 гг. в Европе широко распространилось применение смеси светильного и водяного газов. Понижение теплотвор-

ной способности городского газа позволило подавать потребителям смесь из 60% ретортного газа (5450 *кал/м*³) и 40% коксового водяного газа (2700 *кал/м*³). В настоящее время целью карбюрирования является получение газа, равноценного по теплотворной способности смеси ретортного и водяного газов.

В Германии большая часть городского газа (1934 г. — $4{,}6 \cdot 10^9$ *м*³) состоит из смеси светильного и водяного газов.

В 1931 г. в Англии было произведено $8{,}4 \cdot 10^9$ *м*³ газа, из которых карбюрированного водяного газа $1{,}2 \cdot 10^9$ *м*³. В Америке доля водяного газа еще значительнее.

За последние 20 лет водяной газ нашел новое весьма важное применение в химической промышленности для целей гидрогенизации жиров, синтеза аммиака, метанола и бензина.

Большая часть мирового производства водорода — $9 \cdot 10^9$ *м*³ — базируется на водяном газе. Для годового производства 300 000 *т* бензина (Германия) требуется $0{,}3 \cdot 10^9$ *м*³ водяного газа [4].

Широкое применение получил разработанный «I. G. Farbenindustrie» способ газификации подсушенного бурого и каменного угля в генераторе Винклера на парокислородном дутье (50%-ный кислород при синтезе аммиака и почти чистый кислород — при получении водорода для гидрирования) или на водяной газ с получением газа, содержащего мало углеводородов. В некоторых установках одновременно с получением водяного газа разлагают продукты сухой перегонки (генераторы Бубиаг—Дидье, Виаг и др.).

Развитие генераторов водяного газа. Внедрявшийся в промышленность метод получения водяного газа прерывистым процессом был связан с большими потерями тепла.

Киргамы в 1852 г. установили котел, использующий тепло газов воздушного дутья для получения пара.

Стронгом впервые было использовано тепло газов воздушного дутья для нагрева шамотной насадки и перегрева в ней пара.

Наличие большого количества отбросного тепла в современных установках водяного и двойного водяного газов позволяет требуемые для установки пар и энергию получать за счет этого тепла и даже отдавать их на сторону.

Применявшиеся вначале генераторы обслуживались вручную и отличались способами подвода дутья и отвода газов и устройством нижней части. В Европе первоначально получили развитие три типа генераторов: E. W. — A. G., Дельвика—Флейшера и Штрахе.

Генераторы E. W. — A. G., сконструированные Блассом, были в Европе первыми генераторами значительного размера. В этих генераторах дутье воздухом вели снизу, а паром — всегда сверху. Ввиду высокой температуры в нижней части генераторы не имели колосниковых решеток, и нижняя часть генератора снабжалась кольцом, охлаждаемым водой.

Вследствие высоких температур в слое топлива продукты воздушного дутья содержали большое количество окиси углерода, и поэтому установки E. W. — A. G. были экономичны только при использовании продуктов воздушного дутья для целей отопления или для силовых нужд.

В генераторе Дельвика—Флейшера паровое дутье вели попеременно то снизу, то сверху. Дельвиком было предложено вести интенсивное воздушное дутье, что является его заслугой.

В генераторе Штрахе решетки нет. Генератор в нижней части имел охлаждение. Работа велась с более низкими температурами, чем в генераторах E. W. — A. G. Для дожигания продуктов воздушного дутья вверху генератора вводился воздух. Тепло продувочных газов использовалось для получения и перегрева пара.

В генераторах водяного газа значительно позже, чем в других, стали применять вращающиеся решетки, охлаждающие кожухи и автоматические питатели, однако современные генераторы значительных размеров содержат эти элементы. Сухое уплотнение генератора позволило применить высокие давления дутья.

Управление в больших установках водяного и двойного водяного газов автоматизируют.

В последнее время генераторы совершенствуются в направлении использования более дешевых сортов топлива и создания конструкций, пригодных для непрерывного процесса.

Водяной газ из битуминозных топлив. Битуминозные топлива дешевле кокса, и в странах, применявших водяной газ, замена кокса углем была выгодна даже при ухудшении использования тепла в генераторе.

Попытки применения для получения водяного газа битуминозных топлив начались со времени внедрения водяного газа в промышленность. Однако только с резким изменением условий топливного рынка, вызванным мировой войной, и ростом потребления газа для целей освещения и домашнего отопления, а также в связи с необходимостью удешевления сырья и расширения сырьевой базы началась усиленная работа в этом направлении. Возникшие при этом трудности заключались в ухудшении процесса газификации и использования топлива.

В результате стремления получить газ с высокой теплотворной способностью без карбюрирования был сконструирован генератор со швельшахтой и отводом газов воздушного дутья между шахтой для газификации и швельшахтой.

В предложении заменить кокс углем, впервые сделанном Блассом (E. W. — A. G.) в 1885 г., уже имеет место разделение генератора на верхнюю шахту и основную, причем предполагались: коксование угля за счет передачи тепла путем внутреннего обогрева и газификация кокса на водяной газ.

В 1885 г. фирма «Andrea» в Вене предложила использовать тепло газов воздушного дутья, а также физическое тепло водяного газа для внешнего обогрева реторты.

По этим предложениям в одном аппарате объединяются устройства для сухой перегонки и газификации. Кремер и Арт предложили применять сдвоенные генераторы для уменьшения высоты слоя и увеличения содержания в продувочном газе углекислоты. При паровом дутье газы последовательно проходят обе шахты.

За несколько лет до мировой войны газификация битуминозных углей в Англии производилась в сдвоенных генераторах Тулли (Tully) с частичным разложением летучих.

Однако в описанных конструкциях тепло, выделяющееся при

газификации, использовалось плохо. Проблема получения водяного газа с использованием продуктов сухой перегонки практически была разрешена Штрахе, построившим в 1912 г. генератор двойного газа. Эти генераторы первоначально строились с ретортами, затем — со швельшахтами. Вначале целью получения двойного газа была замена кокса другими топливами, потом — получение газа с высокой теплотворной способностью. Также и первоначальное получение низкотемпературной смолы уступило место повышению теплотворной способности и количества газа.

Попытки применения для получения водяного и двойного газов бурого угля были неудачны в силу его большой влажности, значительного уноса и легкоплавкости золы. Поэтому бурый уголь стали применять в смеси с коксом и спекающимися углями.

Выявилась успешность газификации длиннопламенного угля, почти не применявшегося ранее в производстве светильного газа. Этот уголь не принимает при нагревании пластического состояния и следовательно не препятствует проходу газов. Стремление к улучшению использования в генераторах тепла и повышению теплотворной способности газа вызвало ряд усовершенствований в процессе и попыток к получению газа непрерывным путем.

Для более полной перегонки топлива в швельшахту стали вводить (с 1920 г.) сильно подогретую часть (циркулирующую) двойного водяного газа (или сильно перегретый пар), а также применять сильный внешний обогрев во все время работы. Смолу двойного газа стали преимущественно разлагать. Карбюрацию газа за счет вводимого извне топлива стремятся производить в самом генераторе.

Некоторый интерес представляет газификация битуминозных топлив с высокой реакционной способностью на водяной газ при низких температурах с большой добавкой перегретого пара. При этом возможно получение газа с высоким содержанием водорода и углекислоты, значительным—метана и малым—окиси углерода.

Для получения газа, богатого водородом ($CO+2H_2$), в последнее время стали применять в качестве дутья смесь водяного пара и продуктов сухой перегонки — обычно газов. Водород вносится продуктами перегонки с свободном виде и освобождается при разложении углеводородов.

Развитие методов получения водяного газа непрерывным процессом. Изыскание путей для получения водяного газа непрерывным процессом особенно усилилось с применением битуминозных топлив для получения водяного газа ввиду увеличения потерь при воздушном дутье.

Для получения водяного газа непрерывным процессом предлагались различные способы.

Еще в 1880 г. было предложено вводить все требуемое для получения водяного газа тепло с сильно перегретым в регенераторе паром, что было затруднительно. Позднее стали предлагать ввод недостающего тепла с сильно подогретой циркулирующей частью газа (1891), внешний обогрев генератора, обогрев с помощью электроэнергии, отбор из генератора кокса.

В настоящее время продолжаются работы в целях реализации предложений Гиллебранта и Геллера.

Способ Гиллебранта, заключающийся в введении в генератор сильно нагретого циркуляционного газа, отличается от других аналогичных способов охлаждением циркуляционного газа до подогрева, что позволяет применить для подачи газа обыкновенные вентиляторы. Способ Геллера, предложившего внешний обогрев камер, в которых газифицируется угольная пыль, и воскресившего идею внешнего отопления реторт, интересен тем, что позволяет использовать для газификации отбросные и более дешевые мелкие сорта топлива.

В последнее время для непрерывного получения водяного газа применена сравнительно сложная конструкция Дидье. Генераторы Дидье представляют собой комбинацию печи сухой перегонки и генератора водяного газа с внешним обогревом части камеры, в которой происходит образование водяного газа. Зоны подсушки и предварительной перегонки объединены в одной камере (отделенной от камеры коксования), и получаемые в них газы и пары отводятся отдельно, причем после улавливания из них смолы и сернистых соединений они используются для отопительных целей.

Продукты коксования движутся в прямотоке вниз, а снизу подается перегретый до 450 — 500° водяной пар.

Отбор газов производится в середине. В присутствии раскаленного кокса газообразные и парообразные продукты разлагаются, и образуется окись углерода и водород (нужна смесь $CO+2H_2$). Кокса в установке, объединяемой в батарею, получается достаточно для отдельного получения водяного газа для отопления печи. Размер кусков топлива — 5—25 *мм* (или брикеты).

Способ Дидье (Бубиаг — Дидье) позволяет использовать для получения газа для синтеза не только каменные, но и бурые угли.

Шмидтом и Грю предложено подводить тепло к газифицирующемуся в стальных трубах топливу путем наружного обогрева труб.

Получение газа на дутье, обогащенном кислородом. Получение высококалорийного газа путем использования смеси обогащенного кислородом воздуха и перегретого пара (возможно и углекислоты) было запатентовано еще в 1898 г. обществом льдоделательных машин Линде; для обогрева реторт и получения ценных продуктов перегонки намечалось использование физического тепла газов. Вскоре Гемпелем были проведены опыты, в результате которых был получен высококалорийный газ с большим содержанием CO и значительным содержанием CO_2. С 1920 г. интерес к газификации за счет кислорода, сначала отбросного, а затем и специально получаемого, возрос. Как показали исследования, при малой добавке к дутью пара и высоких температурах (больше 1000°) можно получить газ, содержащий много окиси углерода и мало углекислоты, при большой добавке пара и работе с молодыми топливами при низких температурах можно получить газ с высоким содержанием водорода и углекислоты.

Возможность непрерывного интенсивного получения газа на парокислородном дутье была вполне установлена опытами Драве (1927 г. и позднее).

В настоящее время газификация на парокислородном и углекислородном дутье внедряется в промышленность. За границей (в генераторах Винклера) в больших количествах газифицируют мелкозер-

нистое топливо на парокислородном дутье в целях получения газа в качестве химического сырья.

В последние годы возник интерес к газификации на парокислородной смеси под высоким давлением, что позволяет получить газ с высоким содержанием метана и водорода; этот газ может быть использован в качестве городского газа или химического сырья. Соответствующие исследования были произведены на опытном генераторе Лурги. До сих пор, насколько известно, практического применения газификация под высоким давлением не получила.

Развитие методов получения высококалорийного газа из мелкозернистого топлива. Стремления к использованию низкосортных топлив и к повышению производительности генераторов привели к газификации мелких сортов топлива.

Клаусс (1900) предложил получать водяной газ непрерывным путем из угольной пыли. Тепло для процесса должно было передаваться через стенки за счет сжигания части получаемого газа. Клаусс же предлагал непрерывное получение водяного газа из пылевидного угля за счет добавки к дутью кислорода или обогащенного кислородом воздуха. Бурдит предлагал вводить дополнительное тепло циркуляционным газом и примешивать к угольной пыли минеральные добавки в качестве катализатора для получения газообразных углеводородов. Герцберг (1928) получил водяной газ из буроугольной пыли в обогреваемой снаружи вертикальной камерной печи. Клецер предложил непрерывное получение водяного газа из пыли в камере, на дне которой находится расплавленный шлак, нагреваемый за пределами камеры газификации.

В 1906 г. Баллей провел газификацию пыли в токе высокоперегретого пара в периодически нагреваемом регенераторе с сильно разогретой насадкой.

Геллером были проведены уже упомянутые опыты по получению водяного газа из пыли в ячеечном генераторе с высоко развитой поверхностью нагрева и с использованием для отопления отдельно получаемого генераторного газа.

В последние годы водяной газ из мелкозернистого топлива периодическим процессом получали в генераторах Винклера. Характерным для подобного процесса [1] является наличие в генераторе малого количества угля при большой его поверхности и следовательно быстрая реакция слоя на изменение режима. Для аккумулирования тепла генератор снабжался кирпичной насадкой. В этих же генераторах Винклера в настоящее время широко практикуется непрерывное получение на парокислородном дутье газа в качестве химического сырья.

В СССР проведены успешные опыты газификации различных мелких углей в генераторе типа Винклера (Институт азота) и фрезерного торфа во взвешенном состоянии (Институт газа и жидкого топлива — ВНИГИ) (1936 — 1938).

[1] Как и для газификации пыли.

☆

Глава I

ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ В ГАЗОГЕНЕРАТОРАХ, И ПОЛУЧЕНИЕ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА

☆

1. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ГАЗИФИКАЦИИ

В газогенераторном процессе основными являются вопросы, связанные с количеством выделяемого тепла, со скоростью реакций и с протеканием их в известном направлении и до известного предела. Химическая термодинамика, охватывающая учение о химическом равновесии и скорости химических реакций, разъясняет сущность этих вопросов.

С развитием химической термодинамики как науки появилась возможность изучать химические процессы с качественной и, что особенно важно, с количественной стороны. Это изучение имеет огромное практическое значение. Для неизученных процессов химическая термодинамика позволяет, не прибегая к эксперименту, предсказать возможность протекания и направление процесса в тех или иных условиях, результаты воздействия на него тех или иных факторов и количественные соотношения. Для изученных процессов термодинамические подсчеты дают возможность представить себе идеальные (предельные) показатели, в данных условиях для рассматриваемого процесса. При изучении вопросов газификации, где экспериментирование встречает значительные затруднения ввиду протекания реакций в гетерогенной среде, особо важным является использование химической термодинамики как теоретической основы методов изучения процессов.

В дальнейшем кратко излагаются основные принципы и уравнения химической термодинамики, необходимые для изучения процессов, связанных с газификацией.

Химическое равновесие и закон действия масс

При приведении в соприкосновение веществ A и B, способных реагировать между собой, и при соответствующих условиях начинается реакция с образованием новых веществ C и D. Согласно принципу динамического равновесия, одновременно начинает протекать обратная реакция взаимодействия продуктов C и D с образованием исходных веществ A и B. С течением времени скорость прямой реакции (образование веществ C и D) уменьшается, так как уменьшаются ко-

личества веществ A и B, а скорость обратной реакции (образование веществ A и B) увеличивается. Через некоторое время наступает такой момент, когда скорости прямой и обратной реакций сравниваются, т. е. количество образовавшихся в единицу времени веществ C и D из веществ A и B будет вступать в реакцию с образованием вновь веществ A и B. Внешне будет казаться, что реакция остановилась, на самом же деле она течет, но с равными скоростями в прямом (образование веществ C и D) и обратном (образование веществ A и B) направлениях. В таком случае говорят, что наступило состояние химического равновесия:

$$mA + nB \rightleftarrows pC + qD.$$

Согласно закону действующих масс, сформулированному в 1867 г. Гульдбергом и Вааге, скорости реакций пропорциональны концентрации реагирующих веществ. Скорость прямой реакции равна:

$$v_1 = K_1 C_A^m \cdot C_B^n,$$

где K_1 — коэфициент пропорциональности, называемый константой скорости реакции,

C_A и C_B — концентрации веществ A и B.

Скорость обратной реакции соответственно равна:

$$v_2 = K_2 C_C^p C_D^q.$$

В состоянии равновесия:

$$v_1 = v_2,$$

или

$$K_1 C_A^m C_B^n = K_2 C_C^p C_D^q,$$

или

$$\frac{C_A^m C_B^n}{C_C^p C_D^q} = \frac{K_2}{K_1} = K, \qquad (1)$$

где K — константа равновесия реакции.

Константа равновесия реакции при постоянной температуре есть постоянная величина.

Последнее уравнение выражает закон действующих масс: в состоянии равновесия отношение произведений концентраций исходных веществ к произведению концентраций получающихся веществ есть величина постоянная (при постоянной температуре).

Закон действующих масс справедлив как для гомогенных, так и для гетерогенных равновесий; концентрация чистых конденсированных веществ равна 100%, т. е. единице.

Так, для реакции $C + CO_2 \rightleftarrows 2CO$ выражение для константы равновесия имеет следующий вид:

$$K_p = \frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2}},$$

если углерод участвует в реакции в чистом виде (а не в виде, например раствора в железе).

Так как уравнение (1) справедливо для реакции, протекающей при постоянной температуре, то оно называется уравнением изотермы реакции.

При выводе константы равновесия реакцию обычно пишут так, чтобы положительный тепловой эффект был в правой части стехиометрического уравнения, в числителе помещают концентрации исходных веществ, а в знаменателе — концентрации продуктов.

В зависимости от того, в каких единицах выражена левая часть уравнения (объемные концентрации — C, парциальные давления — P и числа частиц — n), получают различные значения для K, т. е. соответственно:

$$K_c = \frac{C_A^m C_B^n}{C_C^p C_D^q}; \quad K_p = \frac{P_A^m P_B^n}{P_C^p P_D^q} \quad \text{и} \quad K_n = \frac{n_A^m n_B^n}{n_C^p n_D^q}.$$

Между K_p, K_c и K_n существует следующая зависимость:

$$K_p = K_c (RT)^\gamma \quad \text{и} \quad K_n = K_c V^\gamma,$$

где γ — изменение числа молей при реакции,

V — объем реагирующей смеси.

Если $\gamma = 0$, т. е. реакция протекает без изменения объема:

$$K_p = K_c = K_n.$$

Вообще говоря, K_p, K_c и K_n имеют различные числовые значения; K_p и K_c отличаются друг от друга постоянным множителем $(RT)^\gamma$; K_n зависит от объема V или при газовых реакциях — от давления P реагирующей смеси.

Учение о химическом равновесии имеет очень большой теоретический и практический интерес. На основании учения о равновесии удалось решить основную задачу химической термодинамики — определение и вычисление сродства реакций и равновесных концентраций. В практике знание констант равновесия реакций дает возможность вычислять идеальные выхода того или иного продукта реакции при данных условиях и широко применяется в химической технологии. Наибольший практический интерес представляет величина K_p, так как значительная часть химических процессов, имеющих промышленное использование, протекает между газами или при участии газов. При изучении процессов газификации пользуются исключительно величиной K_p.

Химическое сродство

Протекание реакций сопровождается изменением внутренней энергии, результатом которого является затрата или совершение работы.

Причиной изменения внутренней энергии является свободная энергия, т. е. химическое сродство реагирующих веществ. За меру сродства принимается максимальная работа, которая может быть получена при реакции, если ее вести в условиях полной обратимости, за вычетом совершенной внешней работы в случае изменения объема. Величина максимальной работы определяет степень химического

сродства, а знак — направление. Чем больше максимальная работа реакции, тем больше сродство реагирующих веществ. С ростом максимальной работы уменьшается величина константы равновесия, т. е. реакция идет до более полного превращения исходных веществ в продукты. Таким образом увеличению максимальной работы отвечает более полное протекание реакции, что и указывает на большее сродство реагирующих веществ друг к другу. Отрицательные значения максимальной работы означают невозможность самопроизвольного течения реакции в прямом направлении и возможность самопроизвольного течения в обратном направлении. Нулевое значение максимальной работы соответствует состоянию равновесия.

Следует различать максимальную работу при постоянном давлении A_p и при постоянном объеме A_v. Вообще говоря $A_p \neq A_v$; если же реакция протекает без изменения объема, то $A_p = A_v$.

Максимальная работа при постоянном давлении определяется из выражения:

$$A_p = -RT\left(\ln K_p - \ln \frac{P_A^m P_B^n}{P_C^p P_D^q}\right),$$

где R — газовая постоянная,
T — абсолютная температура,
K_p — константа равновесия реакции,
P_A^m и P_B^n — парциальные давления исходных реагирующих веществ,
P_C^p и P_D^q — парциальные давления продуктов реакции.

Максимальная работа при постоянном объеме определяется из выражения:

$$A_v = -RT\left(\ln K_c - \ln \frac{C_A^m C_B^n}{C_C^p C_D^q}\right),$$

где C_A^m и C_B^n — концентрации исходных реагирующих веществ,
C_C^p и C_D^q — концентрации продуктов реакции.

Из приведенных выражений следует, что сродство, характеризуемое максимальной работой реакции, не есть неизменное свойство вещества: оно меняется с концентрацией (или парциальным давлением) и температурой.

Ввиду того что максимальная работа может принимать различные значения в зависимости от произвольно выбираемых концентраций или парциальных давлений, для целей сравнения вводится понятие нормального химического сродства. При этом исходят из концентрации или парциальных давлений всех компонентов, равных единице.

«Нормальное сродство» определяется из выражений:

$$A_{p\ норм} = -RT \ln K_p .$$

$$A_{v\ норм} = -RT \ln K_c .$$

Если реакция протекает без изменения объема, то $A_p = A_v$, вообще же $A_p \neq A_v$.

Одну из этих величин (обычно $A_{p\ норм}$) приводят в таблицах.

На рис. 1 приведена зависимость $A_{p\ норм}$ от температуры для различных реакций газогенераторного процесса ([12]). Для получения истинной величины максимальной работы в данных условиях к полученной по рисунку величине $A_{p\ норм}$ следует прибавить величину:

$$RT \ln \frac{P_A^m P_B^n}{P_C^p P_D^q} .$$

Указанные уравнения, дающие возможность вычислить химическое сродство реакций, протекающих при постоянной температуре, называют уравнениями изотермы реакций Вант-Гоффа.

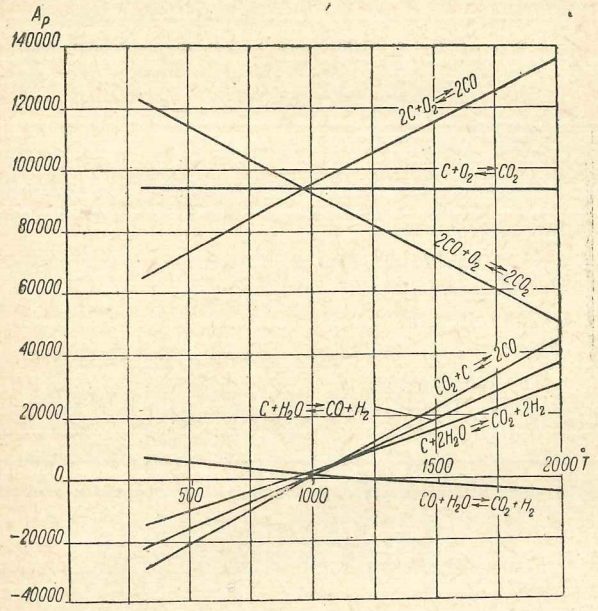


Рис. 1. Зависимость свободных энергий реакций генераторного процесса от температуры

Тепловой эффект реакции

В результате протекания химических реакций происходит превращение химической энергии, проявляющееся в выделении или поглощении тепла. Количество выделенного или поглощенного тепла пропорционально прореагировавшим массам, и следовательно для получения сравнимых результатов его необходимо отнести к определенному количеству вещества — обычно граммолекуле или килограммолекуле. Тепловым эффектом реакции называют количество тепла, полученное в результате превращения при реакции химической энергии в тепловую, происшедшего при постоянной температуре и для молекулярных количеств исходных веществ.

Тепловой эффект реакций обычно выражают в калориях (больших или малых).

В соответствии с тем, выделяется или поглощается при реакции тепло, различают экзотермические и эндотермические реакции.

Это деление условно, так как большинство реакций обратимо и знак теплового эффекта определяется направлением реакции в данный момент.

Различают тепловой эффект при постоянном давлении Q_p и при постоянном объеме Q_v. Разницей между ними при реакциях между твердыми или жидкими веществами пренебрегают.

Для газовых реакций следует различать, какую мы имеем величину — Q_p или Q_v.

Для реакций идеальных газов между Q_p и Q_v существует следующая зависимость:

$$Q_v = Q_p + \Delta nRT,$$

где Δn — число избыточных молекул правой части химического уравнения по сравнению с левой частью,
T — абсолютная температура процесса,
R — газовая постоянная,
т. е. величина Q_v больше Q_p на величину работы расширения; при сжатии — наоборот.

Тепловой эффект реакции меняется в зависимости от агрегатного состояния реагирующих веществ, среды, в которой происходит реакция и от температуры.

Опыт показывает, что тепловой эффект реакции меняется с температурой. Исследуя эту зависимость, Кирхгофф вывел следующий закон (1858): температурный коэфициент теплового эффекта равен разности сумм теплоемкостей исходных и полученных веществ:

$$\frac{dQ}{dt} = \Sigma C_1 - \Sigma C_2, \qquad (2)$$

где ΣC_1 — сумма теплоемкостей исходных веществ,
ΣC_2 — сумма теплоемкостей конечных веществ.

Для вычисления теплового эффекта реакции при любой температуре надо знать зависимость теплоемкостей реагентов от температуры и тепловой эффект реакции при какой-нибудь одной температуре (для определения Q_0).

Если сумма теплоемкостей исходных веществ ΣC_1 и сумма теплоемкостей конечных продуктов ΣC_2, то тепловой эффект при любой температуре T (Q_T) может быть вычислен из выражения:

$$Q_0 - \Sigma C_2 T = -\Sigma C_1 T + Q_T;$$
$$Q_T = Q_0 + \Sigma C_1 T - \Sigma C_2 T;$$
$$Q_T = Q_0 + \Sigma C_0^T T,$$

где $\Sigma C_0^T T$ — алгебраическая сумма средних теплоемкостей от 0° до $T°$ исходных веществ и продуктов реакции.

Если теплоемкость продуктов реакции больше, чем исходных

веществ, то Q_T меньше Q_0, и наоборот. Если теплоемкости равны, то тепловой эффект не меняется с температурой.

Закон Киргоффа имеет очень большое значение для теоретических расчетов процессов газификации.

Тепловой эффект реакции не зависит от промежуточных стадий, а лишь от начального и конечного состояний системы. Этот закон, открытый Гессом в 1840 г. и представляющий собой приложение первого закона термодинамики к химическим процессам, имеет большое практическое значение.

Пользуясь этим законом, можно вычислить недоступные для прямого измерения тепловые эффекты реакций, комбинируя реакции, в которых участвуют нужные вещества и для которых известны тепловые эффекты. Из закона Гесса вытекает также, что с тепловыми эффектами реакций можно производить алгебраические действия.

Зависимость химического равновесия от температуры

Зависимость константы химического равновесия от температуры можно вывести, воспользовавшись уравнением Гельмгольца, объединяющим первое и второе начала термодинамики, и уравнением сродства.

Уравнение Гельмгольца для процесса, идущего при $v = \text{const}$:

$$-Q_v + A_v = T\frac{dA_v}{dT}, \qquad (a)$$

где Q_v — тепловой эффект реакции,
A_v — максимальная работа.

Уравнение сродства:

$$A_v = -RT \ln K_c. \qquad (b)$$

Диференцируя уравнение (b) по T имеем:

$$\frac{dA_v}{dT} = -RT\frac{d\ln K_c}{dT} - R\ln K_c. \qquad (c)$$

Подставим найденное выражение для $\frac{dA_v}{dT}$ из уравнения (c) в уравнение (a):

$$-Q_v + A_v = -RT^2\frac{d\ln K_c}{dT} - RT\ln K_c.$$

Так как

$$-RT\ln K_c = A_v,$$

имеем:

$$-Q_v = -RT^2\frac{d\ln K_c}{dT}$$

или

$$\frac{d\ln K_c}{dT} = \frac{Q_v}{RT^2}.$$

Данное уравнение носит название уравнения изохоры ($v = \text{const}$) реакции.

Аналогичное выражение получается при $P = \text{const}$ и носит название уравнения изобары реакции:

$$\frac{d \ln K_p}{dT} = \frac{Q_p}{RT^2}.$$

Подставляя значение $R = 1{,}986$ *кал* и переходя от натуральных логарифмов к десятичным, получаем зависимость константы равновесия от температуры в общем виде:

$$\frac{d \lg K}{dT} = \frac{Q}{4{,}571\, T^2}.$$

Из рассмотрения данного уравнения следует, что когда $Q > 0$, то

$$\frac{d \lg K}{dT} > 0,$$

т. е. при экзотермической реакции величина константы равновесия растет с температурой, что означает сдвиг равновесия в сторону образования исходных веществ.

Если $Q < 0$, то

$$\frac{d \lg K}{dT} < 0,$$

т. е. при эндотермической реакции величина константы равновесия уменьшается с температурой, что означает сдвиг равновесия в сторону образования продуктов.

Резюмируя, можно сказать, что нагревание сдвигает равновесие в сторону процесса, идущего с поглощением тепла (эндотермического), а охлаждение сдвигает его в сторону процесса, идущего с выделением тепла (экзотермического). Изучение тепловых эффектов реакций дает возможность предвидеть в условиях равновесия течение химических реакций и управлять ими.

Выводы, вытекающие из рассмотрения уравнения изохоры, находятся в соответствии с так называемым принципом Ле-Шателье-Брауна, гласящим, что под влиянием внешнего воздействия, нарушающего равновесие, равновесная система изменяется в направлении противодействия этому воздействию. Так например увеличение давления при реакции, идущей с изменением объема, вызывает смещение равновесия в сторону уменьшения объема, и повышение температуры при реакции, идущей с выделением тепла, вызывает смещение равновесия в сторону образования исходных продуктов, и наоборот. Принцип Ле-Шателье применим только к равновесным системам и, не давая возможности делать количественных выводов, позволяет судить качественно о направлении процесса.

Таким образом при помощи уравнения изохоры реакции можно, зная тепловой эффект реакции, указать направление реакции при изменении температуры.

Для применения уравнения изохоры для расчетов тепловых эффектов реакций при изменении температуры от T_1 до T_2 его необходимо проинтегрировать:

$$\int_{K_1}^{K_2} d \ln K = \int_{T_1}^{T_2} \frac{Q dT}{RT^2}.$$

Принимая, что Q не зависит от температуры и является постоянной величиной, получаем:

$$\ln \frac{K_2}{K_1} = \frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right),$$

или после преобразования:

$$Q = \frac{4{,}571\ T_1 T_2\ (\lg K_2 - \lg K_1)}{T_2 - T_1}.$$

Сделанное допущение о независимости теплового эффекта реакции от температуры, вообще говоря, неверно. Поэтому выведенное уравнение может служить лишь для грубых подсчетов и для малых интервалов температур, а также для случаев, когда Q мало изменяется с температурой.

При низких температурах тепловой эффект заметно меняется с температурой и при интегрировании уравнения изохоры необходимо ввести $Q = f(T)$.

Зависимость теплового эффекта Q_p от температуры при $p = \text{const}$ следующая:

$$Q_p = Q_{p_0} + \alpha T + \beta T^2 + \gamma T^3 + \ldots, \text{ где}$$

Q_{p_0} — тепловой эффект реакции при $T = 0$,
α, β и γ — постоянные для данных температуры и веществ.

Подставив это выражение в уравнение изобары, имеем:

$$\frac{d \ln K_p}{dT} = \frac{Q_{p_0}}{RT^2} + \frac{\alpha T}{RT^2} + \frac{\beta T^2}{RT^2} + \ldots$$

Интегрируя, получим:

$$\int d \ln K_p = \int \frac{Q_{p_0}}{RT^2}\ dT + \int \frac{\alpha}{RT}\ dT + \int \frac{\beta}{R}\ dT + \ldots$$

$$\ln K_p = -\frac{Q_{p_0}}{RT} + \alpha \frac{\ln T}{R} + \frac{\beta T}{R} + \ldots + C, \qquad (3)$$

где C — константа интегрирования.

Подставив полученное уравнение (3) в уравнение химического сродства: $A_p = -RT \ln K_p$, получаем уравнение Габера:

$$A_p = -RT \ln K_p = Q_{p_0} - \alpha T \ln T - \beta T^2 - \ldots - C\, RT. \qquad (4)$$

Аналогично имеем:

$$\ln K_c = -\frac{Q_{v_0}}{RT} + \alpha \frac{\ln T}{R} + \frac{\beta T}{R} + \ldots + C.$$

$$A_v = -RT \ln K_c = Q_{v_0} - \alpha T \ln T - \beta T^2 - \ldots - C\,RT.$$

Пользуясь приведенными уравнениями, можно вычислить константы равновесия реакций при любых температурах, а также сродство реакций. Для этого надо знать значения α, β, γ и т. д. при какой-нибудь одной температуре. Зная константу равновесия и температуру, можно определить константу интегрирования C. Следовательно необходимо каким либо возможным путем определить K, иначе будет неизвестна константа интегрирования. Константу равновесия можно определить или экспериментально или с помощью теоремы Нернста, зная только тепловой эффект и теплоемкость.

Однако пользование уравнением Нернста в развернутом виде осложняется тем, что не имеется достаточно данных по изменениям теплоемкостей в зависимости от температуры и по кривым упругостей паров чистых веществ, необходимых для вычисления химических констант.

Сделав ряд упрощений в своей формуле, Нернст предложил так называемые приближенные уравнения.

1-е приближенное уравнение. На основании экспериментальных исследований Нернст установил, что для большинства случаев можно считать $\alpha = 3{,}5$ на моль газа и зависимость теплового эффекта от температуры можно выразить уравнением:

$$Q_p = Q_{p_0} + \Sigma n \cdot 3{,}5\, T + \beta T^2,$$

где n — алгебраическая сумма молекул.

Так как зависимость теплоемкости от температуры выражается рядом

$$C_p = C_{p_0} + aT + bT^2 + \ldots,$$

то для суммы реагирующих веществ

$$\Sigma nC_p = \Sigma nC_{p_0} + \Sigma naT + \Sigma nbT^2 + \ldots$$

Принимая, что

$$\Sigma nC_{p_0} = \alpha$$

и

$$\sum \frac{na}{2} = \beta,$$

получим:

$$\Sigma nC_p = \alpha + 2\beta T + \ldots$$

откуда

$$\beta = \frac{\Sigma nC_p - \alpha}{2T} = \frac{\Sigma nC_p - \Sigma n \cdot 3{,}5}{2T}.$$

Подставляя значение β и $\alpha = 3{,}5\,\Sigma n$ в развернутое уравнение Нернста и ограничивая ряд на T^2, получим:

$$\lg K_p = -\frac{Q_{p_0}}{4{,}571\,T} + 1{,}75\,\Sigma n \lg T + \frac{\Sigma nC_p - \Sigma n \cdot 3{,}5}{4{,}571 \cdot 2} + \Sigma (nC'),$$

где C' — условные химические константы.

2-е приближенное уравнение. Так как теплоемкости веществ не всегда известны, то Нернст делает еще два упрощения: вместо Q_{p_0} берет Q_p и пренебрегает высшими степенями температуры.

Исходя из этих предположений, получаем вторую приближенную формулу:

$$\lg K_p = -\frac{Q_p}{4{,}571\,T} + 1{,}75\,\Sigma n \lg T + \Sigma (nC').$$

Для реакций, идущих без изменения объема, $\Sigma n = 0$, т. е.

$$\lg K_p = -\frac{Q_p}{4{,}571\,T} + \Sigma (nC').$$

Для грубо ориентировочных расчетов можно принять $C' = 3$, т. е.

$$\lg K_p = -\frac{Q_p}{4{,}571\,T} + 1{,}75\, n \lg T + 3n.$$

В приближенных формулах мы имеем условные химические константы, вычисленные из эмпирических формул и действительные только в предположении $\alpha = 3{,}5$. Значения условных химических констант обычно приводятся в таблицах.

Приведенные формулы справедливы также, если в реакции наряду с газами участвуют твердые тела. Вторая приближенная формула при этом не меняется; в первой приближенной формуле в третьем члене надо учесть теплоемкость твердых тел.

Расчет равновесных соотношений

Расчет равновесий, исследование которых представляет трудности, можно производить, разлагая изучаемую реакцию на более простые — изученные — и при помощи известных констант вычисляя искомую.

Методика расчета выходов ясна из следующего примера.

Имеем реакцию: $C + CO_2 = 2CO$. Давление в равновесной смеси равно P; в начале реакции имелся 1 моль CO_2. Предположим, что образовалось $2a$ молей CO; при этом, согласно стехиометрическому уравнению реакции, прореагировало a молей CO_2 и объем CO_2 стал равным $1-a$. Объем всей смеси: $1 - a + 2a = 1 + a$. Парциальные давления:

$$P_{CO} = P\,\frac{2a}{1+a}; \quad P_{CO_2} = P\,\frac{1-a}{1+a}.$$

Подставляя выражения для P_{CO} и P_{CO_2} в уравнение константы равновесия:

$$K_p = \frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2}},$$

Библиотека имени В. И. Ленина

имеем:

$$K_p = \frac{\left(P\frac{2a}{1+a}\right)^2}{P\frac{1-a}{1+a}} = \frac{4Pa^2}{1-a^2}.$$

Зная K_p для данной температуры, определяем величину a из уравнения:

$$a^2 = \frac{K_p}{4P+K_p}.$$

Процентное содержание CO в равновесной смеси равно:

$$\%\ CO = \frac{2a}{1+a}\cdot 100.$$

В общем случае газогенераторного процесса при дутье из смеси пара, кислорода и азота, если пренебречь реакциями образования аммиака, сероводорода и тяжелых углеводородов, можно применить следующую методику расчета выходов.

В газогенераторе происходят следующие реакции:

$$C + O_2 = CO_2.$$
$$2C + O_2 = 2CO.$$
$$2CO + O_2 = 2CO_2.$$
$$2H_2 + O_2 = 2H_2O.$$
$$C + CO_2 = 2CO.$$
$$C + H_2O = CO + H_2.$$
$$C + 2H_2O = CO_2 + 2H_2.$$
$$CO + H_2O = CO_2 + H_2.$$
$$C + 2H_2 = CH_4.$$
$$2CO + 2H_2 = CH_4 + CO_2.$$
$$CO + 3H_2 = CH_4 + H_2O.$$
$$CO_2 + 4H_2 = CH_4 + 2H_2O.$$

В условиях генераторного процесса последние восемь реакций являются обратимыми. Положение равновесия их зависит от температуры, при которой протекает процесс, и состава исходной газифицирующей смеси. Из указанных обратимых реакций можно выбрать три, из которых вытекают все остальные и положение равновесия которых определяет состав генераторного газа. Подобными реакциями могут служить например следующие:

$$C + CO_2 = 2CO$$
$$CO + H_2O = CO_2 + H_2$$
$$2CO + 2H_2 = CH_4 + CO_2.$$

Состав газа, состоящего из H_2, CO, CH_4, CO_2, N_2 и H_2O, может быть установлен, если составить связывающие их шесть уравнений.

Подобными уравнениями могут служить выражения для констант равновесия трех приведенных реакций, равенство соотношений водорода и азота и кислорода в исходной дутьевой смеси и в полученном газе и равенство суммы парциальных давлений отдельных газов общему, а именно:

$$K_{p_1} = \frac{P^2_{CO}}{P_{CO_2}}.$$

$$K_{p_2} = \frac{P_{CO}\cdot P_{H_2O}}{P_{CO_2}\cdot P_{H_2}},$$

$$K_{p_3} = \frac{P^2_{CO}\cdot P^2_{H_2}}{P_{CH_4}\cdot P_{CO_2}}.$$

$$\frac{2P_{CH_4} + P_{H_2O} + P_{H_2}}{2P_{CO_2} + P_{H_2O} + P_{CO}} = \frac{P'_{H_2O}}{2P'_{O_2} + P'_{H_2O}} = A.$$

$$\frac{P_{N_2}}{2P_{CO_2} + P_{H_2O} + P_{CO}} = \frac{P'_{N_2}}{2P'_{O_2} + P'_{H_2O}} = B.$$

$$P_{CO} + P_{CO_2} + P_{H_2} + P_{H_2O} + P_{CH_4} + P_{N_2} = P$$

В приведенных уравнениях P_{CH_4}, P_{H_2O}, P_{H_2}, P_{CO_2}, P_{N_2} и P_{CO} представлют собой парциальные давления соответственных газов, содержащихся в равновесной смеси в генераторном газе, а P'_{H_2O}, P'_{N_2} и P'_{O_2} — парциальные давления H_2O, N_2 и O_2 в исходной газифицирующей смеси.

Постоянные A и B подсчитывают, исходя из отношения азота и водяного пара к кислороду в исходной газифицирующей смеси.

Расчеты химического сродства при помощи абсолютного значения энтропий реагирующих веществ

Из термодинамики известна следующая зависимость:

$$A_p = Q_p + T\Delta S, \qquad (5)$$

где A_p — свободная энергия, или максимальная работа, при постоянном давлении,

Q_p — тепловой эффект процесса при постоянном давлении,

$\Delta S = S_2 - S_1$ — изменение энтропии процесса, равное алгебраической сумме энтропий реагирующих веществ,

T — абсолютная температура.

Зная тепловой эффект реакции при каких-либо определенных условиях, можно по закону Кирхгоффа вычислить тепловой эффект для любых условий, если известны теплоемкости. Абсолютная величина энтропии при любой температуре может быть найдена для всех веществ, изменение теплоемкости которых с температурой известно. Энтропии многих веществ для «стандартного» состояния (25° C = 298° K и давления в 1 *am*) даются в таблицах. Можно сначала вычислить A_p для стандартных условий и затем по уравнению:

$$A_p = -RT \ln K_p = Q_{p_0} - \alpha T \ln T - \beta T^2 - \ldots - CRT$$

вычислить A_p для требуемой температуры.

Зная A_p, можно по уравнению:

$$A_p = -RT \ln K_p$$

определить константу равновесия реакции.

При энтропийных расчетах обычно пользуются обозначениями Льюиса и Рэндла:

$$A_p = -\Delta F \text{ и } Q_p = -\Delta H,$$

т. е.

$$\Delta F = \Delta H - T\Delta S.$$

Для 298° К

$$\Delta F_{298} = \Delta H_{298} - 298\,\Delta S.$$

Пересчет теплоемкостей, тепловых эффектов реакции и свободных энергий в зависимости от температуры производят по формулам:

$$\Delta C_p = \Delta\Gamma_0 + \Delta\Gamma_1 T + \Delta\Gamma_2 T^2 + \ldots \quad \text{(а)}$$

$$\Delta H = \Delta H_0 + \Delta\Gamma_0 T + \frac{1}{2}\,\Delta\Gamma_1 T^2 + \frac{1}{3}\,\Delta\Gamma_2 T^3 + \ldots \quad \text{(б)}$$

$$\Delta F = \Delta H_0 - \Delta\Gamma_0 T \ln T - \frac{1}{2}\,\Delta\Gamma_1 T_2 - \frac{1}{6}\,\Gamma_2 T^3 - \ldots - IT. \quad \text{(в)}$$

Ход расчетов следующий. По таблицам находят стандартные тепловой эффект реакции, энтропии и теплоемкости реагентов и подсчитывают ΔH_{298}, ΔF_{298} и ΔC. Из сравнения уравнения (а) и полученного выражения для ΔC находят Γ_0, Γ_1 и т. д. Затем определяют из уравнения (б) ΔH и, подставляя его значение в уравнение (в) для ΔF_{298}, находят I. Зная I, получают уравнение для ΔF в зависимости от температуры. Вычислив ΔF для данной температуры из уравнения $A_p = -RT\ln K_p$, определяют K_p.

Основы химической кинетики

Химическая кинетика — один из разделов физической химии, занимающийся вопросом скоростей химических реакций, т. е. тем, как при определенных условиях процесса происходит изменение системы во времени. Эта задача представляет большие трудности, так как опыт показывает, что скорость реакции зависит не только от концентрации реагирующих веществ, но и от присутствия других веществ (катализаторов), которые в уравнение реакции не входят.

Аналогично принятому в физике понятию о скорости как производной пути по времени, скорость химической реакции определяется как производная концентрации по времени:

$$v = -\frac{dC}{dt}.$$

Для характеристики скорости данной реакции достаточно знать изменение во времени концентрации одного из веществ, участвующих

в реакции, так как скорости изменения концентрации всех реагентов находятся в определенной зависимости между собой.

Так называемые односторонние реакции, т. е. идущие до конца, различаются своим порядком. Порядок реакции определяется общим числом молекул, вступающих в реакцию.

Мономолекулярными реакциями, или реакциями первого порядка, называются те, в которых превращается лишь один вид молекул и стехиометрический коэфициент в уравнении реакции равен единице.

Бимолекулярными реакциями, или реакциями второго порядка, называются те, в которых реагируют две однородные или разнородные молекулы, т. е. стехиометрический коэфициент равен двум.

Тримолекулярными реакциями, или реакциями третьего порядка, называются те, в которых участвуют три одинаковых или различных молекулы и т. д.

На основании уравнения реакции судить о ее действительном порядке нельзя.

Принципиально все реакции обратимы. Однако часто разница между скоростью прямой v_1 и скоростью обратной v_2 реакции очень велика. Например если v_1 очень велико по сравнению с v_2, то можно практически не считаться с обратной реакцией и за результирующую скорость реакции принимать скорость прямой реакции. Большинство реакций, имеющих место в процессе газификации, относятся к этому типу (так называемые изолированные реакции).

Мономолекулярные реакции встречаются сравнительно редко. Классическим примером мономолекулярной реакции является распад радиоактивных атомов.

Бимолекулярные реакции представляют собой большинство реакций, протекающих в газах и растворах.

Тримолекулярные реакции также встречаются сравнительно редко. Реакции более высоких порядков с достоверностью не наблюдались. Они протекают отдельными последовательными ступенями первого, второго и третьего порядка.

Порядок прямой и обратной реакций может быть различным. Порядок реакции определяется числом молекул с переменной концентрацией, т. е. конденсированные вещества не учитываются.

Скорость данной реакции зависит от концентрации, давления, температуры и присутствия катализаторов. В случае гетерогенных реакций большую роль играют скорость диффузии и характер поверхности.

1. Зависимость скорости реакции от температуры. Скорость химической реакции зависит от температуры: как правило, она значительно и закономерно растет с повышением температуры. Для большинства реакций с ростом температуры в арифметической прогрессии скорость реакции растет в геометрической прогрессии.

Температурным коэфициентом скорости реакции называется отношение скоростей данной реакции при температуре t и $t+10°$, т. е.

$$\frac{K_{t+10}}{K_t}.$$

Температурные коэфициенты различных реакций примерно одинаковы. В соответствии с этим имеем правило Вант-Гоффа: при по-

вышении температуры на 10° скорость многих реакций возрастает в 2—3 раза.

Аррениус предложил следующую эмпирическую формулу для зависимости скорости реакции от температуры:

$$\lg K = B - \frac{A}{T},$$

где A и B — константы, характерные для данной реакции.

Так как скорость химических реакций быстро растет с температурой, то при очень высоких температурах скорость поверхностных процессов — окисления углерода и разложения CO_2 и H_2O—определяется скоростью диффузии газов, а не скоростью самой химической реакции с углеродом. По этой же причине при очень высоких температурах не имеет особого значения для реакций генераторного процесса различие в реакционной способности топлива.

2. **Зависимость скорости реакций от концентрации.** Скорость реакции пропорциональна произведению концентраций реагирующих веществ:

$$aA + bB + \ldots = nN + mM + \ldots$$

$$v = KC_A^a C_B^b \ldots,$$

где K — константа скорости реакции,
C_A и C_B — концентрации реагирующих веществ.

Общее выражение для скоростей реакции

Для мономолекулярной:

$$-\frac{dC}{dt} = KC_A.$$

Если обозначить через C_0 концентрацию вещества A в начале реакции и через C — падение его концентрации за время t, то выражение для скорости реакции примет вид:

$$v = -\frac{dC}{dt} = K(C_0 - C).$$

Например для реакции $CH_4 = C + 2H_2$ имеем:

$$v = -\frac{dC_{CH_4}}{dt} = KC_{CH_4} = K(C_{0_{CH_4}} - C).$$

Для бимолекулярной реакции:

$$A + B = AB:$$

$$v = -\frac{dC_A}{dt} = KC_A C_B,$$

или

$$-\frac{dC_A}{dt} = K(C_{0_A} - C)(C_{0_B} - C).$$

Для тримолекулярной реакции:

$$v = -\frac{dC_A}{dt} = K(C_{0_A} - C)(C_{0_B} - C)(C_{0_C} - C).$$

Например для реакции $2CO + O_2 = 2CO_2$:

$$-\frac{dC_{CO}}{dt} = K(C_{CO})^2 C_{O_2}.$$

В случае гетерогенных реакций концентрация вещества, находящегося в конденсированном состоянии, не входит в уравнение скорости реакции, так как концентрация этого вещества является постоянной. Например для реакции $C + CO_2 = 2CO$:

$$v = KC_{CO_2}.$$

Для гетерогенных реакций возможен также так называемый нулевой и отрицательный порядок реакции. При нулевом порядке реакции изменение концентрации не влияет на скорость реакции, т. е.

$$\frac{dC}{dt} = \text{const}.$$

Реакция нулевого порядка протекает например при газификации с помощью пара активированного древесного угля и графита ввиду лимитирования реакции разложением твердого поверхностного комплекса. В случае реакции отрицательного порядка, например минус первого, скорость реакции изменяется пропорционально величине, обратной концентрации (C^{-1}). Примером реакции минус первого порядка является реакция ретортного углерода с паром при температуре выше 1010°; с уменьшением давления количество пара, разложенного в единицу времени, значительно возрастает.

В случае обратимых реакций наряду с прямой реакцией идет обратная. Общая наблюдаемая скорость соединения равна разности скоростей прямой и обратной реакций. В общем случае имеем:

$$aA + bB + \ldots \rightleftarrows nN + mM + \ldots$$

$$\vec{v}_1 = -\frac{dC}{dt} = K_1 C_A^a C_B^b \ldots$$

$$\overleftarrow{v}_2 = -\frac{dC}{dt} = K_2 C_N^n C_M^m \ldots$$

$$v = v_1 - v_2 = K_1 C_A^a C_B^b \ldots - K_2 C_N^n C_M^m.$$

Из уравнения следует, что результирующая скорость реакции может быть положительной или отрицательной в зависимости от констант скоростей и концентраций.

В момент равновесия:

$$v_1 = v_2,$$

т. е.

$$K_1 C_A^a C_B^b \ldots = K_2 C_N^n C_M^m \ldots$$

или

$$\frac{C_A^a C_B^b}{C_N^n C_M^m} = \frac{K_2}{K_1} = K,$$

где K — константа равновесия.

3. Зависимость скорости реакций от давления. Влияние давления значительно, если реакция протекает в газообразной среде.

Выразив концентрации через парциальные давления $C = \frac{Px}{RT}$, где P — общее давление в системе, а x — объемное содержание компонента, и подставив в уравнения скоростей реакций, получим:

для мономолекулярной реакции:

$$\frac{-d\left(\frac{Px}{RT}\right)}{dt} = K\frac{Px}{RT},$$

или

$$-\frac{dx}{dt} = Kx;$$

для бимолекулярной реакции:

$$\frac{-d\left(\frac{Px}{RT}\right)}{dt} = K\left(\frac{Px}{RT}\right)^2,$$

или

$$-\frac{dx}{dt} = K\frac{P}{RT}x^2 = K'Px^2 \text{ и т. д.;}$$

для реакции n-го порядка:

$$-\frac{dx}{dt} = K_n P^{n-1} x^h.$$

В случае мономолекулярной реакции скорость реакции не зависит от давления, для бимолекулярной реакции скорость пропорциональна давлению. Вообще скорость реакции пропорциональна давлению в степени на единицу меньше показателя порядка реакции.

3. Зависимость скорости реакции от характера и величины поверхности. Для гетерогенных реакций на скорость реакции также влияет характер поверхности раздела фаз. Так например в случае реакции между углеродом и кислородом скорость реакции определяется величиной поверхности углерода (удельной), подвергающейся воздействию кислорода. Чем больше эта поверхность, тем скорее протекает реакция.

Вследствие большого значения твердой поверхности для реакций горения и газификации целесообразно определять константу скорости реакции по отношению к твердой фазе, т. е. определять величину

$$K_s = \frac{K}{A},$$

где A — удельная поверхность (отнесенная к единице объема),
K — константа скорости реакции.

По Гаусбранду [6] для 1000 шарообразных частиц топлива, уложенных так, чтобы объем промежутков между ними был минимальным, объем промежуточного пространства составляет 26% всего объема и объем шаров равняется:

$$V = 523{,}5\ d^3.$$

Суммарная поверхность 1000 шаров:

$$F = 3141{,}5\ d^2.$$

Удельная поверхность шаров:

$$A = \frac{F}{V} = \frac{6}{d}.$$

Следовательно

$$K_s = \frac{K}{6}\ d = 0{,}17\ Kd.$$

Так как K_s не зависит от размера частиц, то

$$K_s = 0{,}17\ K_1 d_1 = 0{,}17\ K_2 d_2,$$

или

$$K_1 = K_2\frac{d_2}{d_1},$$

где d_1 и d_2 — диаметр частиц топлива.

Форма кусков топлива отлична от шарообразной, и с увеличением размера кусков объемный вес топлива увеличивается, что несколько уменьшает влияние размера кусков.

При разнородности размера кусков объем пустот и свободная поверхность всегда меньше, чем при кусках одного размера (безразлично мелких или крупных).

Как видно из выражения для A, с уменьшением размера частиц растет их поверхность ($F_{общ}$). При расположении кусков топлива в слое реагирующая поверхность $F_{акт}$ меньше $F_{общ}$. Для процесса имеет значение $F_{акт}$. При крупных кусках отношение $F_{акт}$ к $F_{общ}$ велико, но $F_{общ}$, а отсюда и $F_{акт}$ — мало. При мелких кусках отношение $F_{акт}$ к $F_{общ}$ мало, но $F_{общ}$ велико. В пылевом потоке $F_{акт} = F_{общ}$.

Поверхность аморфной формы углерода имеет бóльшую реакционную способность, чем инертная поверхность графита.

При данной температуре K_s не зависит от размера частиц, но сильно зависит от характера поверхности. Так K_s в случае реакции $C_{уголь} + CO_2 = 2CO$ гораздо больше, чем для реакции $C_{графит} + CO_2 = 2CO$.

Состояние поверхности топлива имеет огромное значение для газогенераторного процесса. С изменением температуры, с разложением топлива и при взаимодействии углерода топлива с кислородом газов возможны значительные изменения свойств углерода (графитизация),

разрушение кристаллической решетки с обнажением активных атомов, адсорбция газов на поверхности, растворение в слое и образование твердого углеродно-кислородного комплекса, медленно распадающегося и замедляющего протекание реакции.

4. Влияние катализаторов. Катализаторами называются вещества, которые, присутствуя в системе в очень небольшом и нестехиометрическом количестве по отношению к реагирующим веществам, вызывают или изменяют скорость реакции без притока энергии извне. Количество и состав данного вещества остается после реакции таким же, как и до реакции.

В случае обратимой реакции катализатор не смещает положение равновесия (т. е. оказывает одинаковое влияние на скорость прямой и обратной реакций), но ускоряет момент его установления. В случае гетерогенной реакции поверхность раздела фаз оказывает каталитическое воздействие на реакцию, и поэтому все гетерогенные реакции являются каталитическими.

Вопрос катализа — его механизма — является сложнейшим вопросом химической кинетики, и рассмотрение его выходит за пределы данной главы.

Воздействие катализаторов имеет большое значение для газогенераторного процесса. Помимо того что поверхность топлива и отчасти огнеупорной кладки оказывает значительное каталитическое влияние, сильное воздействие оказывает зола топлива, содержащая столь активно влияющие вещества, как соединения Na, K и Fe. Стремление ускорить протекание процессов, особенно при низких температурах, обусловило применение различных каталитически действующих добавок к топливу. Таким образом при газогенераторном процессе имеет значение комбинированное действие каталитических влияний: поверхности топлива, составных частей золы и специально вводимых веществ, огнеупорной кладки и паров воды.

Действие добавок снижается с повышением температуры; повидимому добавки могут оказаться особенно эффективными при газификации при низких температурах в целях получения газа, богатого водородом (синтетический газ), и при высоком давлении—богатого углекислотой и метаном (газ для синтеза и снабжения городов).

5. Зависимость скорости реакций от диффузии. При движении газа или жидкости вдоль твердой поверхности или при движении газа вдоль поверхности жидкости на поверхности соприкосновения неподвижного и движущегося вещества образуется тонкая, почти неподвижная пленка (пограничный слой), которая может быть пройдена веществом лишь при помощи диффузии. Толщина пленки может быть уменьшена посредством увеличения скорости движения вещества. Для случая движения газа около твердой поверхности уменьшение толщины пленки пропорционально скорости движения газа в степени, показатель которой обычно равен 0,6—0,8. Явление образования пленки имеет место и в случае гетерогенных реакций, поэтому скорость гетерогенных реакций находится в зависимости от скорости диффузии.

В случае гетерогенной реакции процесс наиболее интенсивно протекает у поверхности раздела фаз. Исходные вещества быстро расходуются, и в пограничном слое повышается концентрация продуктов реакции. Для интенсивного течения реакции необходимо, чтобы реагирующее вещество, находящееся в газообразной или жидкой фазе, поступало в пограничный слой с достаточной скоростью, определяющейся скоростью диффузии.

При этом может быть два случая:

а) скорость химической реакции больше скорости диффузии и

б) скорость химической реакции меньше скорости диффузии.

В первом случае скорость процесса будет определяться скоростью диффузии. Примером является гетерогенная реакция $C + O_2 = CO_2$. Во втором случае скорость процесса определяется скоростью химической реакции. Примером подобного случая является реакция $C + CO_2 = 2CO$ при превышении скоростью газов известных пределов.

Математически процесс диффузии выражается законами Фика. Согласно первому закону Фика, количество вещества dn, диффундирующего за время dt по сечению F через слой толщиной dx при разности концентраций dC, определяется из выражения:

$$dn = -DF\frac{dC}{dx}dt,$$

где D — коэфициент диффузии в $см^2 сек^{-1}$.

С повышением температуры коэфициент диффузии возрастает и следовательно увеличивается скорость диффузии. При повышении температуры на 1° коэфициент диффузии увеличивается на 2—3%. Следовательно в случае гетерогенных реакций, в которых скорость процесса обусловливается скоростью диффузии, влияние температуры на скорость реакции меньше, чем в остальных случаях.

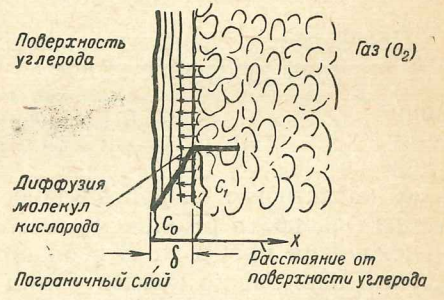


Рис. 2. Схема взаимодействия углерода с кислородом

Скорость диффузии газов и паров пропорциональна абсолютной температуре в степени 1,7—2 и обратно пропорциональна корню квадратному из молекулярного веса. Поскольку окисление углерода определяется исключительно или частично диффузией, влияние температуры является важным фактором для процесса газификации.

Рассмотрим в качестве примера реакцию $C + O_2 = CO_2$*, для которой скорость химической реакции очень велика и общий ход реакции определяется скоростью диффузии кислорода к поверхности углерода. Схематически ход процесса представлен на рис. 2. Концентрацию кислорода, окружающего углерод, можно рассматривать как пространственно постоянную — C_1. Около поверхности углерода имеется пограничный слой толщиной δ, состоящий в основном из

* При высоких температурах и концентрациях O_2; процесс возможен и с промежуточным образованием CO,

продуктов реакции $C + O_2 = CO_2$, который препятствует поступлению кислорода к поверхности углерода. На наружной поверхности пограничного слоя концентрация кислорода также равна C_1. По мере приближения к поверхности углерода она сильно понижается и у самой поверхности имеет очень небольшую величину C_0 вследствие того, что химическая реакция происходит почти мгновенно. Количество кислорода, поступающего к поверхности углерода, определяющее общую скорость реакции, можно вычислить, пользуясь законом Фика:

$$dn = DF_c \frac{C_1 - C_0}{\delta} dt,$$

где F_c — поверхность углерода,
δ — толщина пограничного слоя, через который происходит диффузия,
C_1 и C_0 — концентрации кислорода.

Уменьшение концентрации кислорода в единицу времени составляет при объеме газовой фазы V:

$$\frac{dn}{Vdt} = -\frac{dC_1}{dt}.$$

Если принять, что C_0 невелико по сравнению с C_1, получим:

$$-\frac{dC_1}{dt} = \frac{DF_c}{V\delta} C_1.$$

Полученное уравнение совпадает с уравнением мономолекулярной реакции, каковой и является реакция $C + O_2 = CO_2$, если принять

$$K = \frac{DF_c}{V\delta};$$

В области, где скорость процесса определяется диффузией, суммарная скорость реакции не зависит от особенностей ее химизма и механизма процесса. В этой области все реакции должны иметь первый порядок по концентрации реагирующего газа при постоянном общем давлении и нулевой порядок по давлению при постоянных концентрации реагирующего газа и массовой скорости (произведение скорости потока газа на его плотность). Процесс горения при высокой температуре и давлении O_2 в основном определяется физическими факторами.

Определяемые значения константы скорости реакции, ее порядок и температурный коэфициент являются кажущимися значениями, определяемыми количеством кислорода и динамикой его подвода.

В газогенераторе частица топлива может находиться или в неподвижном слое, или во взвешенном состоянии, или уноситься с газами. При увлечении частицы топлива скорость частицы зависит от скорости потока, плотности и вязкости среды и ее размеров.

Горение частицы топлива является поверхностной реакцией. Скорость протекания этой реакции зависит от величины поверхности

частиц, условий обтекания частиц газами и термохимических и физико-химических свойств самого топлива.

С уменьшением размера частиц топлива растет реакционная поверхность, причем максимальную величину она имеет при сгорании в пылегазовом потоке, в котором частицы не соприкасаются.

В действительности горение пылевидного топлива происходит значительно медленнее, чем это можно было бы предположить.

При турбулентном потоке пограничный слой, обволакивающий частицы, имеет малую толщину, а также происходит лучший обмен газовых частиц у поверхности пограничного слоя. Следовательно при турбулентном движении нагрев топлива и протекание реакций ускоряются.

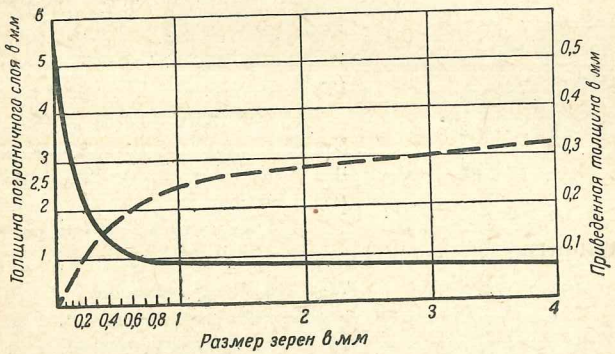


Рис. 3. Зависимость толщины пограничного слоя от размера зерен

Турбулентное обтекание кусочков угля может иметь место лишь при сжигании топлива в слое на решетке при значительных размерах зерен угля и скоростях обтекания воздухом. При увлечении же частиц топлива газами относительная скорость частиц в газе невелика, и происходит ламинарное обтекание зерен. Улучшение перемешивания газов и смена газовых частиц у поверхности пограничного слоя возможны путем создания вихревого потока, вибрации или же витания частиц топлива в газе.

Толщина пограничного слоя при взвешенном состоянии частиц топлива и температуре газовой среды в топочной камере в 1200° представлена на рис. 3 [7]. Приведенные значения следует рассматривать лишь как порядок толщины застойной пограничной оболочки. Эта толщина значительно увеличивается с уменьшением размера частиц. Однако для расчета диффузии кислорода к поверхности слоя важна приведенная толщина застойной оболочки, отнесенная к плоской поверхности.

На рис. 3 пунктиром показана приведенная толщина. Из рисунка видно, что с уменьшением диаметра зерен, особенно менее 0,5 *мм*, приведенная толщина пограничного слоя уменьшается и при этом скорость протекания всех поверхностных процессов, в том числе и горения, должна увеличиваться.

2. СУЩНОСТЬ ГЕНЕРАТОРНОГО ПРОЦЕССА

Общие понятия

Газификацией называется безостаточное превращение твердого топлива [1] в газообразное с помощью кислорода, вводимого самостоятельно, с воздухом, водяным паром и другими газами.

Твердое топливо в его естественном (дрова, торф, каменный уголь), а также искусственном (кокс, брикеты) виде является источником тепла. Будучи сожжено (окислено) до конечных продуктов сгорания (CO_2, H_2O и SO_2), топливо выделяет все тепло, соответствующее его теплотворной способности. Однако возможно использование твердого топлива и в ином виде — не непосредственно, а с предварительным превращением его в газообразное, что преследует цель сжигания его в газообразном виде или получения газа как источника химического сырья.

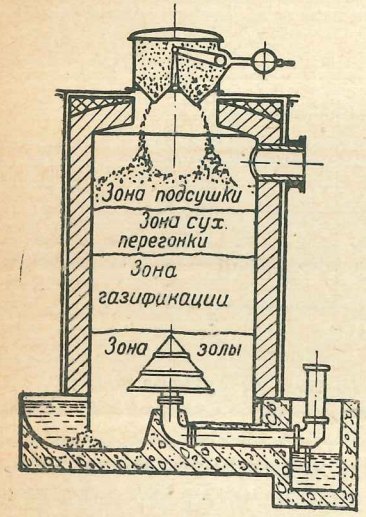


Рис. 4. Распределение зон в генераторе:

Приспособления, в которых происходит превращение твердого топлива в газообразное, называются газогенераторами.

Газогенератор обычно состоит из вертикальной шахты, заполненной топливом, лежащим и горящим на колосниковой решетке. Сверху в шахту забрасывается топливо, а снизу, под колосники, поступает воздух или пар или смесь воздуха и водяного пара.

Можно также подавать обогащенный кислородом воздух, чистый кислород или углекислоту.

Воздух и пар, поднимаясь кверху, взаимодействуют с раскаленным углеродом, в результате чего получается горючее газообразное топливо. Отвод полученного газа производится обычно сверху, над слоем топлива. В нижней части генератора (из-под колосников) удаляются остатки — зола и шлак.

Процесс газификации протекает следующим образом. Забрасываемое в генератор топливо (рис. 4) постепенно опускается вниз, подогреваясь поднимающимся током газов. Вначале оно подсушивается, потом по мере его нагрева из него выделяются продукты сухой перегонки, состоящие из различных газов и паров. Остающийся от топлива разогретый полукокс состоит преимущественно из углерода и золы, а также из небольших количеств кислорода, водорода, азота и серы. Полукокс, опускаясь ниже, нагревается все сильнее, из него выделяются остатки продуктов сухой перегонки, и углерод его начинает реагировать с поднимающимися снизу вверх газами — кислородом, углекислотой и водяным паром. По мере нагрева полукокс переходит в кокс, состоящий почти исключительно из углерода и золы.

[1] Не считая золы, являющейся остатком.

Углерод кокса интенсивно реагирует с поднимающимися вверх газами, образуя генераторный газ, а кокс все более обогащается золой. К основанию генератора (колосниковой решетке или поду) подходят остатки от газификации топлива — зола и некоторое количество невыгоревшего топлива.

Воздух и пар, подаваемые снизу, проходят вначале слой остывающей золы, несколько нагреваются и попадают в слой активно горящего кокса, углерод которого сгорает за счет кислорода воздуха и водяного пара в окись углерода и углекислоту, освобождая водород водяного пара. Образующаяся углекислота, соприкасаясь с раскаленным углеродом, реагирует с ним и переходит в окись углерода. В этой зоне выделяется также небольшое количество газов в результате окончательного разложения топлива.

Поднимаясь выше, получающиеся газы подогревают лежащее вверху генератора топливо и производят его сухую перегонку и подсушку; продукты, образующиеся при перегонке и подсушке, также примешиваются к газу. Иногда газифицирующие газы движутся не снизу вверх, а сверху вниз или в горизонтальном направлении.

Если процесс газификации происходит только за счет кислорода воздуха, то получается так называемый воздушный газ. Он состоит преимущественно из окиси углерода и азота, переходящего из воздуха, а также из некоторого количества углекислоты. При вдувании одного водяного пара получаются преимущественно водород и окись углерода и отчасти углекислота, к которым примешивается неразложившийся водяной пар. Эта смесь газов называется водяным газом.

В случае одновременного подвода в генератор и воздуха и водяного пара получается смесь воздушного и водяного газов (окись углерода, водород, углекислота, азот и водяной пар). Эта смесь газов называется смешанным, или паровоздушным, газом. Соответственные названия дают газам и при ином дутье.

В получении в результате окисления углерода и разложения водяного пара окиси углерода и водорода, способных гореть, и заключается сущность процесса газификации. Необходимым условием получения генераторного газа является предотвращение сгорания образующихся горючих газов.

Большая часть продуктов сухой перегонки способна гореть с выделением значительного количества тепла и обогащает газ, увеличивая его теплотворную способность. Теплотворная способность отдельных газов, входящих в состав генераторного газа, приведена в табл. 4.

Из генератора обычно отводится газ, представляющий собой смесь продуктов газификации и сухой перегонки топлива.

Соответственно процессам, идущим в различных слоях топлива, можно разбить весь слой топлива по высоте на следующие зоны: подсушки топлива, сухой перегонки и газификации, или реакционную. Ниже зоны газификации лежит слой золы, а выше слоя топлива при ведении процесса с восходящим током газов находится газовое пространство.

Таблица 4

Молекулярные веса, объемный вес и теплотворная способность газов

Наименование веществ	Химическая формула	Молекулярный вес	Вес газа (в кг/м³) фактический	Теплотворная способность			
				высшая		низшая	
				в кал/кг-мол	в кал/м³	в кал/кг-мол	в кал/м³
Водород	H_2	2,016	0,0898	68 350	3 050	57 801	2 579
Кислород	O_2	32,000	1,429	—	—	—	—
Азот	N_2	28,016	1,251	—	—	—	—
Окись углерода .	CO	28,01	1,250	67 650	3 018	67 650	3 018
Углекислота . .	CO_2	44,01	1,977	—	—	—	—
Метан, или болотный газ	CH_4	16,04	0,717	213 000	9 505	191 902	8 563
Этилен	C_2H_4	28,05	1,260	335 200	14 955	314 200	14 018
Этан	C_2H_6	30,06	1,356	372 810	16 633	341 310	15 227
Сернистый ангидрид	SO_2	64,07	2,927	22 980	1 020	22 980	1 026
Сероводород . .	H_2S	34,09	1,539	134 470*	6 000*	123 920*	5 530*
Водяной пар . .	H_2O	18,016	0,804	—	—	—	—
Воздух	—	28,853	1,293	—	—	—	—

* При сгорании в H_2O и SO_2.

При подаче газифицирующих газов снизу вверх из генератора отводится смесь продуктов газификации и сухой перегонки топлива. В случае подачи газифицирующих газов сверху продукты подсушки и сухой перегонки топлива подвергаются разложению вследствие высоких температур. Они также подвергаются разложению при поддержании высокой температуры во всем слое топлива.

Зона сухой перегонки

Топливо, засыпанное в генератор, нагревается восходящим током газов. Сначала топливо подсушивается, а затем в результате его разложения начинают выделяться продукты сухой перегонки. Состав их, свойства и количество зависят от природы топлива и условий перегонки. Вообще они состоят из паров воды, углекислоты, тяжелых углеводородов (главным образом этилена), метана, водорода, окиси углерода, паров смол, уксусной кислоты, древесного спирта, азота, аммиака, сероводорода и сернистого газа. При перегонке сначала выделяются влага и окислы углерода, а затем углеводороды, метан и сложные по составу смоляные пары. При нагреве до 150—200° выделяется значительная часть влаги и небольшая CO_2. При температуре 250 — 350° начинается интенсивное разложение топлива с выделением паро- и газообразных продуктов. При достаточной продолжительности нагревания смолистые вещества выделяются полностью при 300—600°. При дальнейшем повышении температуры продолжается выделение CH_4 и особенно H_2.

Молодые топлива — дрова, торф — выделяют при сухой перегонке значительное количество CO_2; это обусловливает даже при хорошем ходе газификации молодых топлив значительное содержание CO_2 в генераторном газе.

При слишком малом времени пребывания топлива в генераторе и следовательно более сильном нагревании смоляных паров и углеводородов они распадаются на CH_4, H_2 и углерод, причем последний выделяется в виде сажи.

Поэтому газификация сухих смолистых топлив (каменных углей) при высоких температурах сопровождается выделением сажи, увеличивающимся при прогаре генератора.

Слой топлива, находящийся над раскаленным слоем, подготавливается — подсушивается, подвергается сухой перегонке, подогревается, понижая температуру генераторного газа. Для получения газа с высокой теплотворной способностью выгодно иметь возможно более горячую раскаленную зону и возможно более холодный газ.

При работе с низким слоем свежего топлива над раскаленным слоем получают так называемый горячий газ, а с высоким слоем — холодный.

В некоторых случаях при возможности использования физического тепла генераторного газа в целях уменьшения выхода смол и углеводородов процесс газификации ведут умышленно при более высоких температурах газа, выходящего из генератора.

При газификации влажных топлив значительная часть тепла поднимающихся газов затрачивается на испарение влаги, и газ имеет низкую температуру.

Уксусная кислота и древесный спирт выделяются при сухой перегонке древесины и торфа.

H_2S при сухой перегонке получается не только в результате разложения органической массы угля (начало удаления органической части серы 300°), но и вследствие разложения пирита, содержащегося в угле, и взаимодействия получающихся продуктов с H_2 и водяным паром (подробнее см. гл. V). CH_4 в условиях генераторного процесса может получаться как в результате разложения топлива и выделяющихся из последнего смол, так и при взаимодействии углерода с H_2 или же при взаимодействии различных газов, составляющих генераторный газ или газ сухой перегонки.

Образованию CH_4 благоприятствуют низкие температуры, т. е. условия, при которых идет сухая перегонка топлива.

Вопрос о промежуточных соединениях, получающихся при образовании CH_4, недостаточно изучен, и возможно например принять следующую реакцию образования CH_4:

$$2CO + 2H_2 = CH_4 + CO_2 + 59\,000 \text{ кал.}$$

Для расчета генераторного газа безразлично, какую принять реакцию образования CH_4.

Остальные реакции получения CH_4 вытекают из приведенной и из других, учитываемых при получении генераторного газа, например:

$$C + CO_2 = 2CO \text{ и } CO + H_2O = CO_2 + H_2.$$

Пользование принятой реакцией образования CH_4 имеет преимущество потому, что газы, участвующие в ней, могут быть легко определены при анализе газа.

При применении катализаторов — железа, никеля, кобальта — образование CH_4 идет интенсивно в температурном интервале 250 — 330°. Ниже 200° скорость реакций, связанных с образованием и разложением CH_4, незначительна даже в присутствии катализаторов.

Реакции взаимодействия CH_4 и газов, получающихся в результате воздействия паров воды на раскаленный углерод, при разных температурах были изучены Майером и Альтмейером [8] (табл. 5). Опыты производились в присутствии никеля или кобальта в качестве катализаторов.

Таблица 5

Равновесный состав газов по реакции:

$2CO+2H_2 \rightleftarrows CO_2+CH_4$ (давление — 1 *ат*)

Температура (абс.)	Состав газа (в объемных процентах)			
	CO	H_2	CO_2	CH_4
700	3,44	3,44	46,56	46,56
800	12,83	12,83	37,17	37,17
900	29,44	29,44	20,56	20,56
1 000	43,06	43,06	6,94	6,94
1 100	48,10	48,10	1,90	1,90

Значения $\lg K_p = \lg \frac{P^2_{H_2} \cdot P^2_{CO}}{P_{CH_4} \cdot P_{CO_2}}$ по данным табл. 5 и вычисленные Шенком [9], приведены в табл. 6.

Таблица 6

	Температура (абс.)							
	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
По Майеру и Альтмейеру	—5,163	—2,71	—0,75	+0,85	+2,17	—	—	—
Вычисленные Шенком	—	—2,37	—0,46	+1,07	+2,27	+3,32	+4,18	+5,55

На рис. 5 приведены значения $\lg K_p$ для реакции $C + 2H_2 = CH_4$. Эти данные, а также исследования [10] содержания CH_4 в равновесной смеси газов по реакциям

$$CH_4 + H_2O \rightleftarrows CO + 3H_2 \text{ и } CH_4 + CO_2 \rightleftarrows 2CO + 2H_2$$

показывают, что при 900° С и атмосферном давлении содержание CH_4 в газе составляет 1—2%. Уже при 500° CH_4 является нестойким, но быстрое термическое разложение наступает при более высоких температурах (1100—1300°).

Данные о равновесных соотношениях по реакции $C + 2H_2 = CH_4$ для графита приведены в табл. 41.

В условиях генераторного процесса содержание CH_4 в газе в значительной мере определяется условиями разложения топлива.

В случае газификации при высоких температурах во всем слое топлива смолистые вещества топлива и CH_4 разлагаются.

Для некоторых производств имеет большое значение получение бедного CH_4 газа, в этом случае процесс газификации ведут при очень высоких температурах в верхней части генератора (см. гл. II — «Генераторы Винклера»).

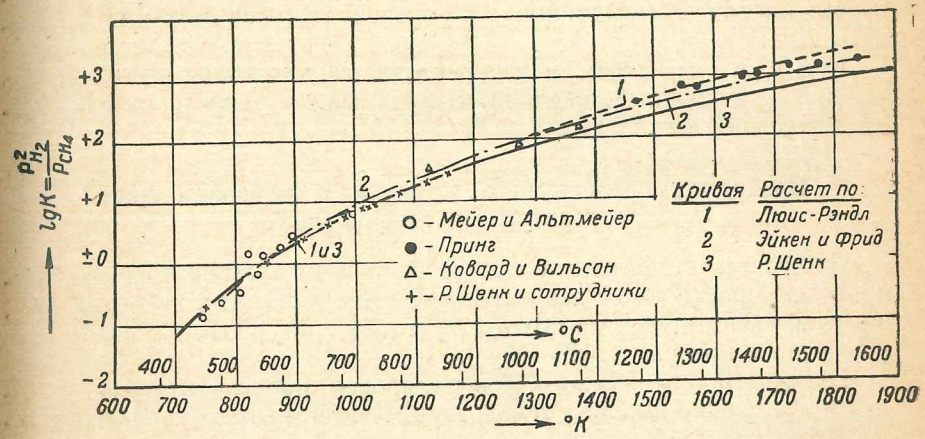


Рис. 5. Зависимость $\lg K_p = \lg \frac{P^2_{H_2}}{P_{CH_4}}$ от температуры

Содержание C_2H_4 в газе может быть лишь очень небольшим и обычно связано с медленностью распада C_2H_4 как продукта разложения топлива.

В зоне сухой перегонки, в области низких температур, может происходить разложение CO на CO_2 и углерод ($2CO \rightarrow CO_2 + C$), а по некоторым данным также реакция:

$$CO + H_2O = CO_2 + H_2.$$

Протекание этой реакции в верхней части слоя топлива, т. е. при температуре ниже 800—900°, недостаточно выявлено.

Протеканию обеих указанных реакций в значительной степени способствует каталитическое воздействие золы и вещества топлива.

Зона газификации

Зоной газификации, или реакционной, может быть названа зона высоких температур в газогенераторе, в которой реакции взаимодействия газов и водяного пара дутья с раскаленным углеродом и дру-

гими составными частями топлива, а также между получающимися газами протекают со значительной интенсивностью.

В зоне газификации могут также протекать реакции образования NH_3, H_2S и SO_2. Условия протекания этих реакций описаны в главе V.

Что касается образования CH_4, то в условиях высоких температур зоны газификации равновесные концентрации CH_4 не велики. В обычных условиях газификации (атмосферное давление) образованием CH_4 в зоне газификации можно пренебречь.

Реакции взаимодействия газов с углеродом и между собой протекают и в более холодных слоях топлива, но с малой скоростью. Поэтому именно условия протекания реакций в зоне высоких температур — в зоне газификации — и определяют собой состав генераторного газа.

Как уже отмечалось, в зависимости от характера дутья можно различать воздушный, водяной, смешанный, регенеративный и парокислородный газы.

Процессы, протекающие в верхней свободной части генератора и газопроводах

Из процессов, протекающих в свободной части генератора и в газопроводах, практическое значение может иметь реакция $2CO \rightarrow C + CO_2$, протеканию которой благоприятствует температура газа в этой части (особенно в интервале 450—550°).

Взаимодействие между CO_2 и углеродом происходит лишь в области достаточно высоких температур. Когда эти газы попадают в область низких температур, реакции протекают настолько медленно, что состав газа можно считать неизменяющимся. Во избежание ухудшения состава газа рекомендуется интенсивно охлаждать верх генератора и быстро понижать температуру газа ниже 450°, что иногда осуществляется устройством металлических крышек, охлаждаемых водой.

Особого практического значения реакция при отсутствии катализаторов не имеет.

Выделение разрушающей футеровку сажи из доменного газа в интервале температур 300—800°, особенно при 400—500°, вследствие реакции $2CO \rightarrow CO_2 + C$ приписывается Осанном [11] и Шенком присутствию окислов железа и металлического железа.

При большом содержании окислов железа в огнеупорном кирпиче футеровки под влиянием каталитического действия окислов железа возможно осаждение в порах кирпичей углерода, ведущее к разрушению кирпича.

В верхней части генератора при высоких температурах имеет место также частичное разложение смол на углеводороды, сопровождающееся выделением сажи.

Много помех в результате описанных процессов причиняют отложения сажи (а также пыли) и конденсирующихся смол в газопроводах, откуда их приходится периодически удалять.

Генераторный газ по выходе из генератора может быть подвергнут очистке и охлаждению.

3. ПОЛУЧЕНИЕ ВОЗДУШНОГО ГАЗА

Если в генератор подается только воздух, то кислород его окисляет углерод топлива в CO_2 и CO, причем благодаря выделяющемуся при этом теплу в нижней части генератора поддерживается высокая температура. При этом могут протекать следующие реакции:

$$C + O_2 = CO_2 + 95\,407 \text{ кал.} \quad (А)$$

$$2C + O_2 = 2CO + 55\,514 \text{ кал.} \quad (Б)$$

$$C + CO_2 = 2CO - 39\,893 \text{ кал.} \quad (В)$$

$$2CO + O_2 = 2CO_2 + 135\,300 \text{ кал.} \quad (Г)$$

Таким образом в системе углерод — кислород могут получиться в результате горения углерода CO и CO_2: первая — при избытке углерода, вторая — при избытке кислорода. CO может при наличии избыточного кислорода сгореть в CO_2, а последняя при нагревании распасться на CO и O_2.

Реакции (А) и (Б) практически идут до конца, и равновесие их непосредственно не может быть изучено. Реакции (В) и (Г) обратимы.

Величины свободных энергий [12] реакций в калориях (падение свободной энергии системы) приведены на рис. 1.

Горение углерода представляет собой сложный процесс, в котором участвуют не только химические, но и физические факторы. При горении углерода имеют место три процесса: подвод кислорода путем диффузии к поверхности углерода, соединение кислорода с углеродом на его поверхности (первичная реакция) и изменение продуктов сгорания в газовой среде и на поверхности углерода при вторичном попадании на его поверхность.

Реакция $C + O_2 = CO_2 + 95\,407$ кал.

Уравнение константы равновесия реакции $C + O_2 = CO_2$, найденное (как и других), исходя из данных, относящихся к графиту, и подлежащее исправлению при переходе к коксу из угля, приведено в табл. 7. K_p выражено через парциальные давления, взятые в долях атмосферы, а T — абсолютная температура в °К.

При температурах, имеющих место в газогенераторе, в равновесной смеси C и O_2 содержится ничтожное количество кислорода, и эту реакцию можно рассматривать как необратимую.

Скорость реакции $C + O_2 = CO_2$ недостаточно изучена, но, как указывают Хаслам и Руссель [3], при 982° она протекает мгновенно; относительная скорость ее при низких температурах выражается, по данным Рида и Уиллера, следующими величинами: при 350° — 1, при 400° — 10 и при 500° — 200.

Реакция $2C + O_2 = 2CO + 55\,514$ кал.

Уравнение константы равновесия реакции $2C + O_2 = 2CO$ приведено в табл. 7.

Реакцию $2C + O_2 = 2CO$ некоторые исследователи считают первичной при горении углерода (первичная теория). Однако и в случае принятия, что углерод сгорает непосредственно в CO_2 (редукцион-

ная теория) с последующим ее восстановлением, приведенное уравнение применяется для выражения конечного результата реакций:

$$C + O_2 = CO_2$$
$$\frac{C + CO_2 = 2CO}{2C + O_2 = 2CO}\ .$$

Реакция $C + CO_2 = 2CO - 39\,893$ кал.

Реакции $C + CO_2 = 2CO$ ранее приписывали превалирующее значение для генераторного процесса. Константа равновесия этой реакции K_{p_1} определяется из выражения:

$$K_{p_1} = \frac{P^2_{CO}}{P_{CO_2}}\ .$$

Взаимодействие CO_2 с углеродом с получением CO идет с увеличением объема и с отрицательным тепловым эффектом. В соответствии с принципом Ле-Шателье, в состоянии равновесия при повышении давления реакция должна итти в сторону образования CO_2, и, наоборот, с уменьшением давления в равновесной смеси должно возрастать содержание CO. Аналогично повышение температуры должно вызывать протекание реакции в сторону образования CO, и наоборот.

Реакция восстановления CO_2 изучалась многими исследователями (Будуаром, Майером, Ридом и Уиллером, Арндтом и Шраубе, Фальке, Елинеком и Дитгельмом, Фальке и Фишером).

Впервые изучал условия равновесия этой реакции Будуар (равновесие Будуара), исследовавший область в пределах 445—925° и исходивший как из CO_2, так и из CO.

Исследования Майера, произведенные с углем из сахара, и Рида и Уиллера — с углем, близким к графиту, а также и другие исследования в основном подтвердили данные Будуара.

Фальке (1927) [13] исследовал равновесие этой реакции в температурном интервале 523—1150° С. Выше 750° результаты измерений совпали с данными других исследований, несмотря на различие аппаратуры и независимо от присутствия или отсутствия катализаторов. При более низких температурах в данных различных исследований оказались большие отклонения. Рассмотрение данных различных исследований приводит Фальке к выводу, что выше 1000° К по реакции повидимому выделяется графит, ниже этой температуры выделяется аморфный углерод.

Уравнение константы равновесия, выведенное Фальке для аморфного углерода (выше 1000° К) и для графита приведено в табл. 7.

В табл. 8 приведены значения $\lg K_p = \lg \frac{P^2_{CO}}{P_{CO_2}}$ по различным исследованиям.

На рис. 6 приведены кривые зависимости $\lg K_p = \lg \frac{P^2_{CO}}{P_{CO_2}}$ от температуры [9].

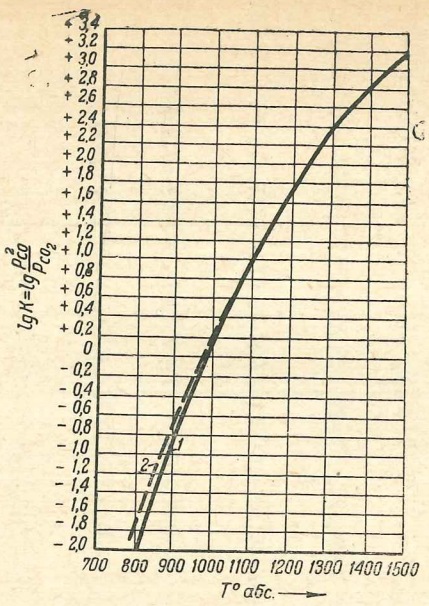


Рис. 6. Зависимость $\lg K_p = \lg \frac{P^2_{CO}}{P_{CO_2}}$ от температуры:

1 — для графита, *2* — для аморфного углерода

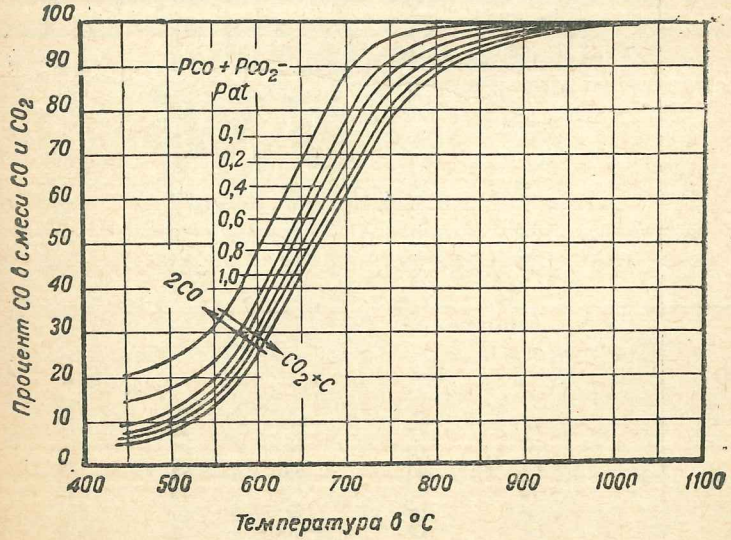


Рис. 7. Изобары равновесия реакции $C + CO_2 = 2CO$

Таблица 7

Уравнения изохор реакций, связанных с газогенераторным процессом

№ п/п.	Реакция	Уравнение изохоры
1	$C + O_2 \rightleftarrows CO_2$ [1]	$\lg K = \lg \frac{P_{CO_2}}{P_{O_2}} = \begin{cases} \frac{*20\,616}{T} + 0{,}5181 \lg T - 0{,}3773 \cdot 10^{-3} T + 0{,}5465 \cdot 10^{-7} T^2 + 0{,}8964 \cdot 10^{-11} T^3 - 1{,}197 \\ \frac{**20\,245}{T} - 1{,}9847 \lg T + 0{,}6842 \cdot 10^{-3} T - 0{,}11817 \cdot 10^{-6} T^2 + 0{,}8964 \cdot 10^{-11} T^3 + 5{,}794 \end{cases}$
2	$C + CO_2 \rightleftarrows 2CO$ [2]	$\lg K = \lg \frac{P^2_{CO}}{P_{CO_2}} = -\frac{40\,800}{4{,}51\,T} + 4{,}864 \lg T - 0{,}301 \cdot 10^{-2} T + 0{,}627 \cdot 10^{-6} T^2 - 0{,}479 \cdot 10^{-10} T^3 - 2{,}926$
3	$C + \frac{1}{2} O_2 \rightleftarrows CO$ [1]	$\lg K = \lg \frac{P_{CO}}{\frac{1}{P^2_{O_2}}} = \begin{cases} \frac{*5886}{T} + 1{,}9548 \lg T - 0{,}11516 \cdot 10^{-2} T + 0{,}1783 \cdot 10^{-6} T^2 - 0{,}295 \\ \frac{**5515}{T} - 0{,}5480 \lg T - 0{,}9011 \cdot 10^{-4} T + 0{,}5443 \cdot 10^{-8} T^2 + 6{,}696 \end{cases}$
4	$2CO + O_2 \rightleftarrows 2CO_2$ [3]	$\lg K = \lg \frac{P^2_{CO_2}}{P^2_{CO} \cdot P_{O_2}} = \frac{29\,500}{T} - 2{,}75 \lg T + 1{,}215 \cdot 10^{-3} T - 1{,}35 \cdot 10^{-7} T^2 - 2{,}20$
5	$C + H_2O \rightleftarrows CO + H_2$ [1]	$\lg K = \lg \frac{P_{CO} \cdot P_{H_2}}{P_{H_2O}} = \begin{cases} -\frac{*6598}{T} + 2{,}9484 \lg T - 0{,}11075 \cdot 10^{-2} T + 0{,}1711 \cdot 10^{-6} T^2 - 0{,}8538 \cdot 10^{-11} T^3 - 0{,}841 \\ -\frac{***6970}{T} + 0{,}44556 \lg T - 0{,}45953 \cdot 10^{-4} T - 0{,}1734 \cdot 10^{-8} T^2 - 0{,}8538 \cdot 10^{-11} T^3 + 6{,}150 \end{cases}$
6	$C + 2H_2O \rightleftarrows CO_2 + 2H_2$ [1]	$\lg K = \lg \frac{P_{CO_2} \cdot P^2_{H_2}}{P^2_{H_2O}} = \begin{cases} -\frac{*4354}{T} + 2{,}50522 \lg T - 0{,}28897 \cdot 10^{-3} T + 0{,}40340 \cdot 10^{-7} T^2 - 0{,}81089 \cdot 10^{-11} T^3 - 2{,}290 \\ -\frac{***4724}{T} + 0{,}242 \cdot 10^{-2} \lg T + 0{,}77249 \cdot 10^{-3} T - 0{,}1325 \cdot 10^{-6} T^2 - 0{,}81089 \cdot 10^{-11} T^3 + 4{,}701 \end{cases}$
7	$CO + H_2O \rightleftarrows CO_2 + H_2$ [4]	$\lg K = \lg \frac{P_{CO} \cdot P_{H_2O}}{P_{CO_2} \cdot P_{H_2}} = -\frac{2203{,}4}{T} - 5{,}1588 \cdot 10^{-5} T - 2{,}5426 \cdot 10^{-7} T^2 + 7{,}4617 \cdot 10^{-11} T^3 + 2{,}3$
8	$2H_2 + O_2 \rightleftarrows 2H_2O$ [5]	$\lg K = \lg \frac{P^2_{H_2} \cdot P_{O_2}}{P^2_{H_2O}} = -\frac{24\,900}{T} + 2{,}335 \lg T - 0{,}965 \cdot 10^{-4} T + 0{,}137 \cdot 10^{-6} T^2 - 0{,}665 \cdot 10^{-10} T^3 + 0{,}1907 \cdot 10^{-17} T^5 - 2{,}17$
9	$CH_4 \rightleftarrows 2H_2 + C$ [1]	$\lg K = \lg \frac{P^2_{H_2}}{P_{CH_4}} = -\frac{3566}{T} + 3{,}32 \lg T + 0{,}175 \cdot 10^{-3} T - 0{,}043 \cdot 10^{-6} T^2 - 5{,}68$
10	$2C + 2H_2 \rightleftarrows C_2H_4$ [6]	$\lg K = \lg \frac{P_{C_2H_4}}{P^2_{H_2}} = -\frac{2413}{T} - 5{,}589 \lg T + 0{,}1025 \cdot 10^{-2} T + 0{,}175 \cdot 10^{-6} T^2 + 13{,}04$

[1] Люис и Рэндл и ICT
[2] Фальке
[3] Вартенберг
[4] Маурер и Бишоф
[5] Зигель
[6] Фрост

* До 1023° К
** Выше 1023° К
*** Для интервала 1023—1873° К
Все данные для графита

На рис. 7 приведены изобары равновесия реакции $2CO \rightarrow CO_2 + C$ для различных давлений [9].

В смеси, соответствующей по составу генераторному газу, выше 700° С реакция пойдет в сторону образования, а ниже 700° — в сторону разложения CO. Чем выше температура, тем полнее восстановление CO_2. При 1000° С налицо условия, благоприятствующие почти полному восстановлению CO_2 в CO.

Та лица

Значения $\lg K_p = \lg \frac{P^2_{CO}}{P_{CO_2}}$ для графита

Температура (в °С)	Будуар	Елинек	Фальке	Средние значения
400	0,75—5	0,205—4	0,798—5	0,917—5
500	0,52—3	0,759—3	0,685—3	0,654—3
600	0,83—2	0,004—1	0,961—2	0,929—2
700	0,91—1	0,998—1	0,040	0,983—1
800	0,79	0,792	1,038	0,840
900	1,52	1,458	1,750	1,576
1000	2,13	2,038	2,261	2,143

Уменьшение давления благоприятствует получению в большем количестве CO и в меньшем — CO_2. Расчеты, произведенные Юптнером [14], показали, что кривые, выражающие влияние изменения давления до 2, 3 и 4 *ат* на состав газа, подсчитанные для условий полного равновесия, вообще на практике не достижимого, лежат на близком расстоянии друг от друга, т. е. значительное изменение состава воздушного газа при этом не имеет места.

Фишер (1932) [15] исследовал влияние понижения давления на ход реакции $C + CO_2 = 2CO$.

Воспользовавшись средними значениями констант по табл. 8, вычисленными различными исследователями, Фишер вычислил соотношения CO_2 и CO для разных температур при низких давлениях для графита. Эти соотношения приведены в табл. 9.

Таблица 9

Содержание CO_2 (в %) в равновесной смеси CO_2 и CO при низких давлениях

Давление (в *ат*)	Температура (в °С)			Давление (в *ат*)	Температура (в °С)		
	500	600	700		500	600	700
1	93,7	75,2	38,6	0,01	54,3	8,9	0,1
0,1	81,4	54,3	8,6	0,001	6,6	0,2	0,1

Свои опыты по изучению влияния понижения давления на восстановление CO_2 Фишер производил над полукоксом из брикетов бурого угля. При исследованиях полукокс помещался в фарфоровой трубке диаметром в 16 *мм* и длиной в 1200 *мм* и нагревался в электрической печи. Газ находился в круговороте до полного установления равновесия. Из данных табл. 10, полученных в результате опытов, видно, что при уменьшенном давлении даже при низких температурах возможно получить газ, состоящий в большей части из CO, тогда как при атмосферном давлении в газе должна находиться преимущественно CO_2.

Таблица 10

Соотношения CO_2 и CO и значения $\lg K_p = \lg \frac{P^2_{CO}}{P_{CO_2}}$ по опытам Фишера

№ п.п.	Давление (в *мм* рт. ст.)	% CO_2	% CO	$\lg K_p$	Температура (в °С)
1	11,9	13,5	86,5	0,938—2	500
2	8,8	11,7	88,3	0,867—2	500
3	6,5	10,0	90,0	0,841—2	500
4	16,6	9,1	90,9	0,297—1	600
5	14,0	8,1	91,9	0,282—1	600
6	13,3	7,7	92,3	0,286—1	600
7	12,1	6,2	93,8	0,354—1	600
8	18,6	0,7	99,3	0,547	700
9	16,5	0,6	99,4	0,553	700
10	9,9	0,3	99,7	0,635	700
11	6,2	0,4	99,6	0,306	700

Равновесие для полукокса и кокса, с которым мы имеем дело в случае генераторного газа, обычно сдвинуто в сторону увеличения содержания CO по сравнению с вычисленным для графита, так как он не состоит из чистого углерода и построен из более сложных молекул.

Эдж и Линке (1928) [16] показали, что смоляной кокс переходит в графит при температурах выше 900°. Они также показали, что при температурах ниже 940° заметно реагирует с CO_2 и паром только аморфный углерод и что отложения графита, полученные разложением углеводородов, не могут дать таких заметных результатов. Такой же вывод, что поверхность кокса неоднородна и что из плавящихся и неплавящихся компонентов угля образуются два рода вещества, делают и другие исследователи.

Дент и Кобб (1929) [17], исследуя равновесие реакции $C + CO_2 = 2CO$ для некоторых разновидностей углерода с Na_2CO_3 в качестве катализатора, показали, что установление равновесия этой реакции зависит от модификации твердой фазы. Содержание CO_2 в состоянии равновесия изменялось от 7 до 13,8%, причем последняя цифра относилась к графиту, а первая — к более активным модификациям. Было установлено, что при продолжительном нагревании при вы-

соких температурах происходит графитизация более активных модификаций.

Скорость реакции $C + CO_2 = 2CO$ сильно растет с температурой.

Механизм реакции $C + CO_2 = 2CO$ исследовался неоднократно, причем во всех случаях было установлено, что продуктом первичной реакции являются CO и твердый углеродно-кислородный комплекс C_xO_y неопределенного состава.

Лангмюр (1915) [18], исследуя при низком давлении восстановление CO_2 раскаленной металлизированной угольной нитью, установил образование комплекса C_xO_y.

М. Майерс (1934) [19] исследовал скорость восстановления CO_2 графитом в зависимости от температуры. Полые цилиндры диаметром в 21,3 *мм* и длиной в 14 *мм*, укрепленные в силлиманитовых держателях, помещались в электрическую трубчатую печь, в которую подавалась CO_2; удельная скорость реакции (количество CO в *см*³/*сек*) при постоянной температуре возрастала с увеличением линейной скорости CO_2 до определенного предела.

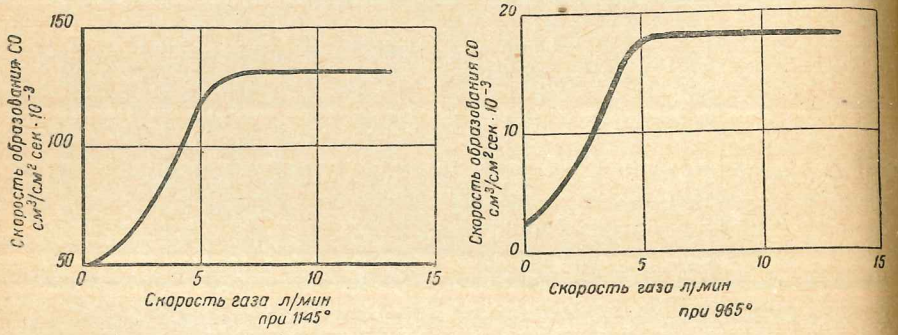


Рис. 8. Зависимость удельной скорости реакции $C + CO_2 = 2CO$ от линейной скорости CO_2 при 1145 и 965° C

Дальнейшее увеличение скорости CO_2 не вызывало возрастания удельной скорости реакции. Зависимость удельной скорости реакции от линейной скорости CO_2 представлена на рис. 8.

По М. Майерсу рассматриваемая реакция относится к гетерогенным реакциям первого порядка, скорость которой A определяется скоростью диффузии. Скорость таких реакций определяется из выражения:

$$A_{опыт} = \sigma P' = \int_{\lambda} \left(-D \frac{\partial P}{\partial x}\right) d\lambda,$$

где σ — скорость реакции при давлении, равном единице,

P' — парциальное давление реагирующего газа у поверхности,

λ — поверхность, через которую происходит диффузия,

D — коэфициент диффузии,

P — парциальное давление продукта реакции.

Интеграл в правой части равенства представляет собой непрерывно растущую функцию скорости газового потока. Так как скорость газо-

вого потока увеличивается, то должно расти и P'. В пределе $P' = P_1$ и $A_{опыт} = A$; здесь P_1 — парциальное давление реагирующего газа вдали от поверхности.

Майерс нашел следующую зависимость скорости восстановления CO_2 — A (в *см*³ CO, образовавшихся в 1 сек. на 1 *см*² поверхности графита) от температуры:

для температурного интервала 950—1300° C:

$$\lg A_1 = 5{,}07 - \left(\frac{38{,}700}{4{,}575\,T}\right);$$

для температурного интервала 850—950° C:

$$\lg A_2 = 3{,}40 - \left(\frac{32{,}360}{4{,}575\,T}\right).$$

Эти уравнения являются частными случаями известного уравнения Аррениуса:

$$\lg A = \frac{E}{4{,}575\,T} + b,$$

где E и b — константы; E — имеет размерность энергии и может быть рассматриваема как энергия активации; b зависит от физических факторов — давления газа и состояния поверхности адсорбированной пленки.

Резкий разрыв непрерывности при 950° в кривой, выражающей зависимость A от $\frac{1}{T}$, Майерс объясняет значительным изменением величины b.

М. Майерс в результате изучения скорости восстановления CO_2 графитом предложил следующую схему реакции:

$$C + CO_2 \rightarrow CO + (C-O)_{тв}.$$
$$(C-O)_{тв} \rightarrow CO.$$

Образующийся на поверхности углерода твердый комплекс $(C-O)_{тв}$ препятствует в местах своего образования окислению углерода. Относительная скорость реакций определяет количество получаемого твердого комплекса и CO. Майерс установил, что ниже 925—950° разложение комплекса происходит медленно, а при более высоких температурах — настолько быстро, что поверхность углерода очищается немедленно и на ней не происходит аккумулирования комплекса. По дальнейшим исследованиям (см. ниже) отдача продуктов реакции постепенно замедляется.

Брюйер и Рейерсон (1934) [20], изучая воздействие определенного объема CO_2 на раскаленный полукокс лигнита и электродный углерод, помещенные в электрическую печь, нашли, что в продуктах реакции помимо свободных CO и CO_2 содержится некоторое количество CO_2, перешедшее в твердый углеродно-кислородный комплекс. Процент CO_2, связанный с углем, достигает постоянной величины после пропускания CO_2 над нагретым углем в течение нескольких часов. Ком-

плекс довольно устойчив при температуре ниже 300°, но с течением времени и при воздействии температуры и вакуума он частично распадается на CO и CO_2. При опытах с лигнитом при температуре 886° и продолжительности контакта угля с CO_2, равной 2,16 сек., распределение CO_2 в образовавшихся продуктах было следующее: в CO — 53,8%, в CO_2 — 30,4% и в комплексе C_xO_y — 15,8%; при 1112° и продолжительности контакта в 6,8 сек.: в CO — 66,6%, в CO_2 — 0,6%; и в C_xO_y — 32,8%; при 1115° и продолжительности контакта в 5,8 сек.: в CO — 74,1%, в CO_2 — 1,1,%, в C_xO_y — 24,8%.

Распределение CO_2 в CO, C_xO_y и CO_2 в зависимости от продолжительности пропускания CO_2 представлено на рис. 9.

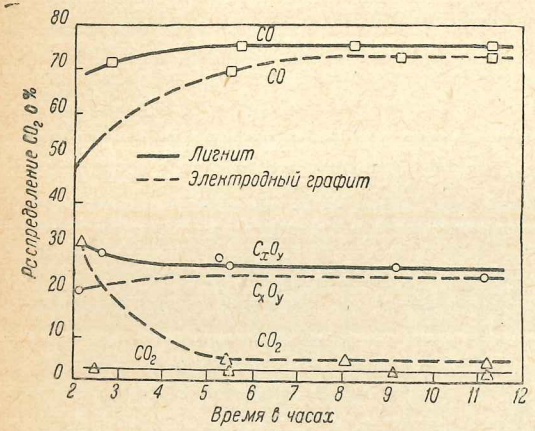


Рис. 9. Распределение углекислоты на получение CO, C_xO_y и CO_2 (1090—1150° С)

Сравнение кривых для лигнитового полукокса и электродного углерода показывает, что только при продолжительности контакта свыше 5 час. распределение CO_2 становится постоянным и что для лигнитового полукокса равновесие устанавливается скорее, чем для электродного углерода.

Количество образующегося твердого углеродно-кислородного комплекса зависит от относительных количеств имеющихся газов и углерода, поверхности углерода, ее реакционной способности, продолжительности соприкосновения, температуры и вероятно еще и других факторов.

Общая тенденция температуры печи повышаться во время экспериментов свидетельствовала о более сильном экзотермическом эффекте, вызываемом связыванием CO_2 нагретым углеродом, чем эндотермический эффект реакции $C+CO_2=2CO$. Вместе с исчезновением заметного количества CO_2 из газообразной фазы это говорит за образование твердого поверхностного углеродно-кислородного комплекса, образующегося при нагревании углерода с CO_2.

Брюйер и Рейерсон предполагают следующий механизм реакции:

$$mC + nCO_2 \rightleftarrows pCO + qC_xO_y.$$

Из данных опыта следует, что p не равно $2n$. Если, как в выражении Маейрса, принять $n=1$, тогда

$$m = 1+x-y,\ p = 2-y \text{ и } q = 1.$$

Общее количество образовавшегося и неразложившегося твердого углеродно-кислородного комплекса составляет в конце нагревания на моль CO_2, израсходованной на получение CO_2 и комплекса:

$$\left(x-\frac{y}{2}\right)C+\frac{y}{2}\ CO_2 \rightleftarrows C_xO_y,$$

и общее количество CO дается реакцией:

$$\left(1-\frac{y}{2}\right)C+\left(1-\frac{y}{2}\right)CO_2 \rightleftarrows (2-y)CO.$$

Джонсом, Кингом и Синеттом [21] было установлено снижение реакционной способности углерода по мере пропускания CO_2. Они определяли относительную активность кокса в течение 20 мин. Вначале обнаруживалась очень высокая реакционная способность, во многих случаях быстро падающая, что объясняется выделением летучих; последующее протекание CO_2 обусловливало дальнейшее понижение реакционной способности до постоянного минимума. Это понижение наблюдалось не только при воздействии CO_2, но и при обработке сильными кислотами.

Авторы пришли к выводу, что активация обусловливается способными восстанавливаться соединениями железа и что в начале процесса присутствует свободное железо. При падении реакционной способности свободного железа уже нет, но после охлаждения и последующего нагревания кокса с соединениями железа, но без CO_2, происходит восстановление железа и наблюдается повышение реакционной способности.

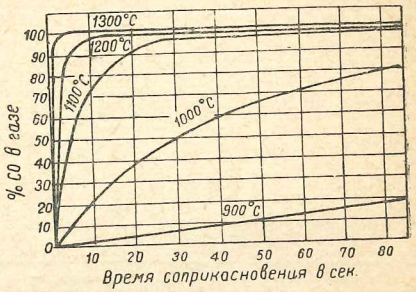


Рис. 10. Зависимость скорости восстановления углекислоты от температуры

В опытах Мартина и Мейера (1935) [22] для исследований взаимодействия с CO_2 применялась угольная нить, предварительно прокаленная в смеси $^1/_3$ CH_4 и $^2/_3$ H_2 до 2800° и покрытая слоем графита. Нить раскалялась при помощи электрического тока. Применялся вакуум, порядка 10^{-6} *мм* рт. ст. Сосуд охлаждался сжатым воздухом.

Реакция графита с CO_2 изучалась до температуры 2600° К.

Согласно работам Мартина и Мейера, поверхность графита в начале контакта с CO_2 быстро отдает образовавшуюся CO, в дальнейшем же происходит отравление поверхности углерода продуктами реакции, удерживаемыми графитовой решеткой. Медленность отделения продуктов реакции, препятствующая оголению активных углеродных атомов, является причиной малой скорости восстановления CO_2 углеродом. Медленное отделение продуктов реакции, определяющее ее скорость, наблюдалось вплоть до максимальной температуры реакции 2327° С.

Было установлено, что реакция $C_{гр}+CO_2$ имеет нулевой порядок и практически не зависит от давления при температурах до 2600° К;

при более высоких температурах наблюдается отклонение к высшему порядку.

Клемент, Адамс и Хескинс (1911) [23] исследовали влияние температуры на скорость восстановления CO_2 различными топливами и получение газа с определенным содержанием CO. Исследуемое топливо с размером кусков около 5 *мм* помещалось в фарфоровую трубку длиной в 60 *см* и диаметром в 1,5 *см*. Через трубку пропускалась CO_2 при температурах 800—1800°. Результаты опытов представлены на рис. 10 и 11.

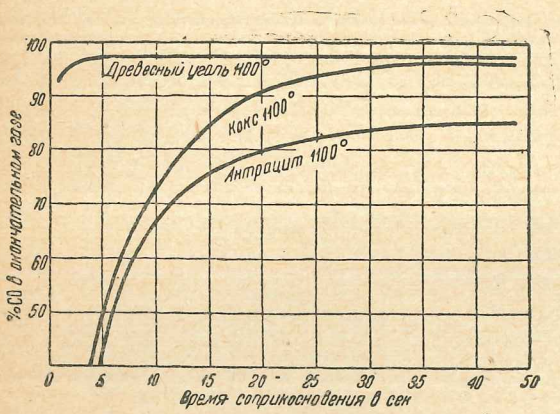


Рис. 11. Скорость восстановления углекислоты коксом, антрацитом и древесным углем

Из результатов опытов (рис. 10) следует, что при 1000° контакт CO_2 с коксом в течение 80 сек. дает 80% CO; если же уменьшить время контакта до 12,5 сек., то газ того же состава может получиться только при 1100°. При контакте в 5 сек. и температуре 1000° получается только 10% CO; то же содержание CO может получиться при 900°, но с увеличением продолжительности контакта до 45 сек.

Клементом, Адамсом и Хескинсом были установлены значения констант скоростей реакций для некоторых топлив (см. ниже).

Рид и Уиллер (1913) [24] пропускали CO_2 через очищенный древесный уголь в фарфоровых трубках. По их данным температурный коэфициент константы скорости реакции $\frac{K_t + 10}{K_t}$ составляет:

900 — 950°	1,44
950 — 1000°	1,36
1000 — 1050°	1,27
1050 — 1100°	1,13

Возможно воспользоваться данными по коэфициентам скоростей реакции $C + CO_2 = 2CO$, установленными Клементом, Адамсом и Хескинсом для вычисления составов газа, получающихся через определенный промежуток времени после начала реакции CO_2 с древесным углем, коксом и антрацитом.

Если K_1 — скорость прямой реакции и K_2 — обратной, (CO) и (CO_2) — концентрации в фунтмолекулах и t — время, то

$$\frac{d(CO)}{dt} = K_1 (CO_2) - K_2 (CO).$$

Значение K_1 для частиц топлива диаметром в 5 *мм* при различных температурах приведено в табл. 11.

Таблица 11

Значения K_1 по данным Клемента, Адамса и Хескинса для реакции

$C + CO_2 = 2CO$

Температура (в °C)	Вид угля		
	Древесный уголь	Кокс	Антрацит
800	0,021	—	—
900	0,159	0,0023	—
1 000	0,629	0,023	—
1 100	1,530	0,134	0,119
1 200	—	0,410	0,237
1 300	—	1,48	0,579

Вообще значения K_1 могут быть вычислены из уравнения:

$$2{,}3 \lg K_1 = \frac{A}{1{,}8\,T} + 1{,}87\,BT + C.$$

Приблизительные численные значения констант A, B и C приведены в табл. 12.

Таблица 12

Значения констант в выражении для скорости реакции

$C + CO_2 = 2CO$ для частиц диаметром в 5 *мм*

Константа	Древесный уголь	Кокс	Антрацит
A	−91,700	−85,100	+57,400
B	— 0,0113	— 0,00539	+ 0,0126
C	+63,38	+45,60	—56,61

В опытах Клемента, Адамса и Хескинса не было учтено влияние скорости движения газов на скорость газификации, что ограничивает возможность использования результатов исследований. Вычисления по приведенным формулам дают результаты, не соответствующие данным процесса газификации на дутье, содержащем кислород, что может служить доказательством того, что в генераторе не получают в качестве первичного продукта углекислоту.

Ниже приводится пример расчета по приведенным выше данным количества CO, получающейся в результате разложения CO_2 за определенное время.

Пример. Вычислить количество CO, получившейся при разложении CO_2 в соприкосновении с частицами кокса диаметром в 5 *мм* в течение 2 сек. при 1200° С.

При этой температуре скорость реакции $2CO \rightarrow C + CO_2$ мала, и ею можно пренебречь.

Если содержание CO_2 в начале реакции ($t = 0$) равно m, содержание CO через промежуток времени t равно x и удельная скорость реакции K_1 равна 0,410, то

$$\frac{dx}{dt} = K_1 \left(m - \frac{m+1}{2} x \right).$$

После интегрирования получаем:

$$K_1 t = \frac{2{,}3}{\frac{1+m}{2}} \lg \left(\frac{1}{m - \frac{1+m}{2} x} \right) + C.$$

Константа интегрирования определяется подстановкой числовых значений.

Если $t = 0$, $m = 1$ и $x = 0$, то $C = 0$.

Если $t = 2$ сек., то

$$0{,}410 \cdot 2 = \frac{2{,}3}{\frac{1+1}{2}} \lg \left(\frac{1}{1 - \frac{1+1}{2} x} \right) \text{ и } x = 0{,}56,$$

т. е. если пропустить CO_2 через слой кокса с размером кусков в 5 *мм* при 1200°, то после соприкосновения в течение 2 сек. в газе будет содержаться 56% CO.

Для древесного угля при температуре 1100°, $m = 0{,}2$ *ата* и времени контакта, равном 0,01 сек., получаем (при подстановке $t = 0$ и $m = 0{,}2$) $C = -2{,}688$; так как $K_1 = 1{,}53$, то $x = 0{,}005$, т. е. в зоне может образоваться всего 0,5% CO.

Аналогично для древесного угля при 1600° получаем 3,5% CO.

Целый ряд исследований показал, что интенсивность восстановления CO_2 в значительной мере зависит от свойств кокса, получаемого из газифицируемого топлива, и что с увеличением продолжительности соприкосновения газов с углеродом количество восстанавливающейся CO_2 увеличивается.

По опытам Адамса, Клемента и Хескинса (рис. 11), древесный уголь обладает большей реакционной способностью, чем кокс и антрацит. Так при 1100° для древесного угля достаточно контакта в 1 сек., чтобы получить практически полное превращение CO_2 в CO, тогда как при коксе и антраците за 5 сек. контакта мы получаем только 50 и 45% CO.

Опыты дали возможность сделать вывод, что скорость превращения CO_2 в CO зависит как от температуры, так и от физических свойств

топлива (поверхности соприкосновения топлива с газом), обусловливаемых пористостью и размером кусков топлива. Для кокса и антрацита переход CO_2 в CO был неполным при малой продолжительности соприкосновения газов с топливом даже при 1800°.

Таким образом для получения по возможности большего количества CO (из CO_2) температура должна быть возможно выше, топливо пористым и мелким и слой топлива — высоким.

Проф. Зайденшнуром (1931) [25] было произведено сравнительное

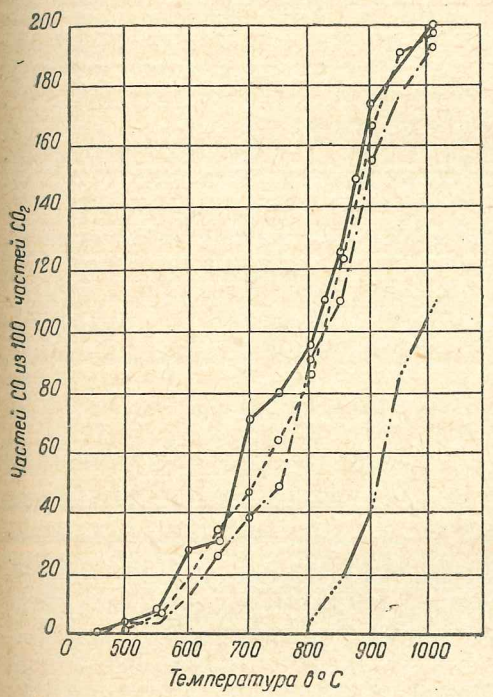


Рис. 12а. Скорость восстановления углекислоты каменноугольным и буроугольным коксом.

———— кокс из подмосковного угля
—·—·— » » » »
— — — — кокс из среднегерманского бурого угля
… — … — кокс каменноугольный

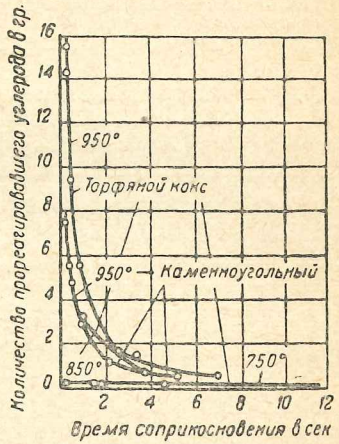


Рис. 12б. Скорость восстановления углекислоты каменноугольным и торфяным коксом

исследование реакционной способности кокса, получаемого при перегонке подмосковного бурого и каменного угля путем пропускания через слой полукокса CO_2. Исследование производилось в вертикальной электрической печи; слой кокса имел высоту в 50 *мм*. Начальная температура реакции составляла 450° и каждые 10 мин. повышалась на 50° до конечной температуры в 1000°.

Исследование свидетельствует о большей реакционной способности кокса из подмосковного угля, который заметно реагирует с CO_2 уже при 600°, тогда как каменноугольный кокс реагирует только при 850°. Эта разница в 250° сохраняется и при высокой температуре.

Полученные результаты представлены на рис. 12а.

Сравнительное исследование активности торфяного и каменноугольного кокса производилось Инсторфом (1932) [26]. Слой кокса высотой

в 200 *мм* помещался в кварцевой или фарфоровой вертикальной трубке и нагревался в электрической печи. Через кокс пропускался с разной скоростью и при разных температурах ток CO_2, и исследовались получавшиеся газы.

Кокс до пропуска CO_2 прогревался для удаления перегоночных газов. Данные опытов приведены на рис. 12б. Торфяной кокс при 850° подвергся такому же разъеданию, как и каменноугольный при 950°.

Из этих данных следует, что торфяной и буроугольный кокс более активны, чем каменноугольный кокс.

Бунте с соавторами (1926) [27] изучал зависимость восстановления CO_2 от температуры для различных топлив. Опыт показал, что в порядке понижения реакционной способности в отношении CO_2 топлива располагаются в следующий ряд: древесный уголь, полукокс, газовый кокс и металлургический кокс.

По данным Кина, Тернера и др. (1934) [28] изучавших реакционную способность антрацита и кокса при 900° и 950°, соотношение восстановительных способностей антрацита и кокса равно 57 : 22.

С увеличением содержания летучих и золы реакционная способность антрацита возрастает.

Восстановление CO_2 происходит при низких температурах неполно, и кроме того требуется продолжительное время для достижения равновесия. Введение окислов и солей металлов повышает скорость реакции. Шенч и Циммерман (1903) [29] показали, что каталитическое воздействие на реакцию оказывают металлы, но не окислы.

Согласно работам Кобба (1927) [30], добавки CaO и особенно Fe_2O_3 и Na_2CO_3 значительно увеличивают скорость восстановления CO_2. Так при 900° С в одних и тех же условиях чистый кокс давал газ с содержанием 14% CO, а с 5% Fe_2O_3 — 70%, с 5% CaO — 63% и с 5% Na_2CO_3 82% и при 1000° соответственно: 47,6; 93; 95 и 97%.

Механизм катализа при помощи Na_2CO_3 изучали Фокс и Уайт (1931) [31]. Продукты взаимодействия Na_2CO_3 и углерода изучались совместным нагреванием их в никелевом тигле при температуре 800—1100° С. Было найдено, что конечный газ состоял почти исключительно из CO. В окислительной атмосфере получались CO_2 и Na_2O. Количественные измерения указали на протекание реакции:

$$Na_2CO_3 + 2C = 3CO + 2Na. \qquad (1)$$

Измерения давления и температуры показали, что процесс начинается при 850° и что давление при 1025° превышает атмосферное.

Фокс и Уайт объяснили каталитическое действие Na_2CO_3 разрушением конденсированной оболочки из CO парами Na и ее переносом в газовую фазу, где реагирующие газы не должны диффундировать через газовую оболочку против встречного потока. Они утверждают, что имели место реакция (1) и последующие, приводящие к регенерации катализатора:

$$2Na + CO_2 = Na_2O + CO. \qquad (2)$$

$$Na_2O + CO_2 = Na_2CO_3. \qquad (3)$$

Вейс и Уайт (1934) [32] исследовали реакцию, обратную реакции (2), и показали, что она в измеримых количествах протекала в интервале 750—950° С.

При исследовании Фишером (1932) [15] влияния минеральных каталитических добавок на установление равновесия над полукоксом были получены результаты, представленные в табл. 13. Добавки составляли 5% в расчете на окись. Полукокс приготовлялся из буроугольного брикета при 550° и имел состав: С — 79,4%, H_2O — 2,6% и золы — 9,7%. Он перемалывался и смешивался с измолотыми добавками. Реакционная фарфоровая трубка диаметром в 16 *мм* и длиной в 600 *мм* обогревалась в электрической печи.

Опыты показали, что скорость реакции повышается под влиянием минеральных добавок. С возрастанием содержания добавок возрастает их ускоряющее действие на реакцию. С повышением температуры влияние добавок уменьшается.

Таблица 13

Влияние каталитических добавок на скорость восстановления углекислоты (CO_2—4 *л/час*; *p=1am*)

Вид добавки	Состав газа	Содержание в % при температуре				
		600°	700°	800°	900°	1000°
Без добавки	CO_2	93,0	71,3	28,7	16,5	3,3
	CO	7,0	28,7	71,3	83,5	96,7
Fe_2O_3	CO_2	95,1	75,0	39,0	11,3	1,4
	CO	4,9	25,0	61,0	88,7	98,6
Al_2O_3	CO_2	88,5	71,7	25,0	8,0	1,3
	CO	11,5	28,3	75,0	92,0	98,7
$CaCO_3$	CO_2	84,7	60,9	21,3	7,7	3,1
	CO	15,3	39,1	78,7	92,3	96,9
Na_2CO_3	CO_2	86,2	50,2	21,2	3,1	1,0
	CO	13,8	49,8	78,8	96,9	99,0
K_2CO_3	CO_2	74,8	42,0	16,7	3,8	0,9
	CO	25,2	58,0	83,3	96,2	99,1

Реакция $2CO + O_2 = 2CO_2 + 135\,300$ кал.

Уравнение константы равновесия реакции $2CO + O_2 = 2CO_2$ приведено в табл. 7.

В равновесной смеси CO_2, CO и O_2 до достижения очень высоких температур преобладает содержание CO_2, т. е. расщепление CO_2 на CO и O_2 очень незначительно и составляет 0,114% при 1100° и 0,4%—при 1550°.

По исследованиям Фалька (1907) [33] над температурами воспламенения смеси CO и O_2 наиболее низкую температуру воспламенения имеет смесь из двух объемов CO и одного O_2, что свидетельствует о тримолекулярном характере горения CO ($2CO + O_2 = 2CO_2$).

По опытам Риделя (1919) [34], в которых смесь H_2 и CO пропускалась над катализатором из окиси железа при 100—400°, а также по

опытам Боне и Хоурда со взрывом смесей из H_2, CO и O_2 эта реакция является бимолекулярной.

В опытах Крейзингера, Аугустина и Овица (1917) [35] над сжиганием смеси CO и H_2, осуществленных при спокойном горении и температуре 900—1500°, обе реакции шли тримолекулярно.

Также и по данным Фалька, определенным по температурам воспламенения при одновременном сгорании CO и H_2, обе реакции идут тримолекулярно. По Фальку температурный коэфициент скорости рассматриваемых реакций $\frac{K_{t+10}}{K_t}$ составляет при 900° — 1,24 и при 1000° — 1,14.

Скорость горения CO очень велика.

По Хасламу и Русселю [3] она протекает медленнее реакций $C + O_2 = CO_2$ и $2H_2 + O_2 = 2H_2O$, и отношение скоростей горения H_2 и CO при спокойном горении, атмосферном давлении, отсутствии катализаторов и наличии избытка воздуха приблизительно равно 2,86.

Исследование химизма процесса получения воздушного газа

Процесс взаимодействия углерода с кислородом является сложным и трудноисследуемым. Вместе с тем выяснение сущности этого процесса важно для возможности освоения и направления процесса газификации. Приложение законов термодинамики без должного экспериментирования является недостаточным для суждения о процессе ввиду того, что эти законы дают закономерности, приложимые к конечным результатам или характеризующие направление процесса в конечном итоге, тогда как для выявления сущности процесса необходим учет механизма реакции с подразделением первичных и вторичных процессов.

Механизм процессов газификации, казавшийся вначале простым, при более детальном изучении оказался очень сложным, связанным с образованием промежуточного углеродно-кислородного комплекса и вторичными процессами, зависящими и от свойств окисляемого углеродсодержащего вещества.

Весьма плодотворным для познания процесса газификации оказалось изучение реакций, происходящих при взаимодействии кислорода и углерода.

Внесению ясности способствовало изучение диффузионной стороны процесса, имеющей большое, а иногда и исключительное значение для процесса газификации.

Дальнейшее теоретическое и экспериментальное изучение вопроса с одновременным учетом химизма процесса и его диффузионной стороны позволило подвести определенную базу под современные представления о процессе окисления углерода. Несмотря на недостаточную изученность процесса в отдельных частях, несмотря на наличие отдельных противоречий в результатах различных исследований, механизм процесса является достаточно ясным для выявления влияния основных факторов. Как будет видно из дальнейшего, изучение вопроса окисления углерода дало возможность отказаться от старых норм для режима газогенераторов, ограничивавших их производительность

и область применения, и дать теоретическое обоснование возможности интенсификации процесса, установленной на практике.

Окисление углерода представляет собой сложный процесс, протекающий в гетерогенной среде, в котором участвуют химические и физические факторы.

При горении углерода имеют место три процесса: подвод кислорода к поверхности углерода путем диффузии, определяемый скоростью диффузии через пленку газа у поверхности углерода, соединение кислорода с углеродом на его поверхности (первичная реакция) и изменение продуктов сгорания в газовой среде и на поверхности углерода при вторичном попадании на его поверхность.

Скорость всех реакций горения увеличивается с температурой. При данных температурных условиях скорость реакции между твердым и газообразным телом зависит от скорости диффузии: так в реакции $C + CO_2 = 2CO$ скорость диффузии CO_2 к поверхности углерода больше скорости химического соединения, и фактором, определяющим скорость процесса, является скорость реакции, скорость же окисления углерода при высоких температурах и концентрациях O_2 настолько велика, что определяющим фактором в этом случае является скорость диффузии O_2 к поверхности углерода.

Почти неподвижная пленка газа у поверхности углерода оказывает основное сопротивление диффузии. Толщина этой пленки уменьшается с увеличением скорости газов, в результате чего скорость реакции увеличивается.

Сложность процессов, протекающих при окислении углерода, и трудность их исследования долгое время затрудняли изучение сущности протекающих явлений и следовательно изыскание оптимальных условий газификации. Существует много различных предположений о механизме горения углерода, которые могут быть объединены в три самостоятельные теории.

1. Редукционная теория. По более старым воззрениям, реакционную зону можно разделить на две части: зону горения и зону восстановления. В зоне горения углерод сгорает в CO_2 ($C + O_2 = CO_2$); последняя же, поднимаясь выше, в зону восстановления, взаимодействует с раскаленным углеродом, в результате чего образуется CO ($C + CO_2 = 2CO$).

Теория первоначального образования CO_2 базировалась на наблюдениях, что алмаз при сильном нагревании сгорает в CO_2 без видимого пламени, а также на исследованиях Смита (1863) [36], обнаружившего, что влажный кислород, поглощенный углеродом при 12° С, выделяется в виде CO_2 при нагревании углерода до 100°.

В настоящее время имеется достаточно данных, чтобы отвергнуть эту теорию.

2. Теория первичного образования окиси углерода. Теория первичного получения CO_2 была поколеблена впервые Бэллом (1872) [37], обнаружившим в пробах газа, взятых непосредственно у фурм доменной печи, большие количества CO и малые CO_2, например CO_2 — 0,76%, CO — 37,6% и N_2 — 61,64%. В дальнейшем С. Бекер (1887) [38] дополнил опыты Смита и показал, что при поглощении высушенного кислорода сухим древесным углем при нагревании до 450° медленно выделяется CO_2, а при более высоких температурах — главным об-

разом CO. Полученная CO не могла явиться продуктом восстановления CO_2 ввиду недостаточно высокой температуры.

Х. Бекер (1888) [39] установил, что при нагревании чистого углерода в атмосфере сухого кислорода углерод не накаливается при соединении с кислородом, как в случае влажного кислорода. В продуктах горения даже при большом избытке кислорода содержится и CO и CO_2. При нагревании древесного угля в сухом кислороде в газе оказалось: O_2 — 55%, CO — 40%; CO_2 — 5%.

По опытам Бекера сухая CO_2 не восстанавливается сухим древесным углем даже при красном калении. Бекер заключил, что влага каталитически влияет на окисление углерода и что первичным продуктом горения углерода является CO.

Диксон с сотрудниками (1891) [40] также пришли к выводу, что первичным продуктом горения углерода является CO. Они наблюдали, что при сжигании циана (C_2N_2) пламя распространяется с большей скоростью, если кислород взят в количестве, необходимом для образования CO ($C_2N_2+O_2$). Фотографиями также было доказано, что при взрыве смеси $C_2N_2+2O_2$ половина кислорода остается инертной и соединяется с первоначально образовавшейся CO после взрыва.

Смительс и Ингл (1892) [41] установили, что в центре пламени C_2N_2 содержится CO и CO_2 в отношении 2 : 1; это в совокупности с опытами Диксона позволяет заключить, что первичным продуктом горения в воздухе газообразных горючих, содержащих углерод, является CO и что CO_2 является продуктом окисления CO.

Это однако еще не позволяет сделать вывода о том, что первичным продуктом горения твердого углерода является CO.

Фаруп (1899) [42] изучал относительные скорости окисления графита и восстановление CO_2. Его опыты показали, что окисление при 450° протекает почти так же быстро, как восстановление при 850°; следовательно более вероятно, что CO является продуктом окисления, а не восстановления.

Ауфгейзер [43] принимает теорию первичного образования CO. Он исходит из того, что тепловой эффект реакции $C+\frac{1}{2}O_2=CO$ меньше теплового эффекта реакции $CO+{}^1/_2O_2=CO_2$ на 39 *кал*:

$$C+\frac{1}{2}O_2=CO+29\ кал;\quad CO+\frac{1}{2}O_2=CO_2+68\ кал.$$

Ауфгейзер считает молекулу углерода многоатомной и принимает следующий механизм горения углерода.

При нагревании в присутствии кислорода или простого кислородного соединения (O_2, H_2O и CO_2) происходит эндотермическое расщепление комплексной молекулы на активные углеродные атомы C_1:

$$C_x=xC_1-39\cdot x\ кал.$$

Активные атомы C_1 взаимодействуют с атомами кислорода, выделяющимися в результате расщепляющего действия накаленного углерода

$$C+\frac{1}{2}O_2=CO.$$

Получившаяся CO сгорает по реакции $2CO+O_2=2CO_2+2\cdot68$ *кал*. Ауфгейзер принимает, что реакционная способность накаленного углерода по отношению к CO_2 и H_2O такая же, как и к O_2, и делает вывод, что первично становятся деятельными атомы кислорода и следовательно первичным продуктом горения углерода является CO.

Независимо от происхождения атома кислорода первичное образование CO протекает по уравнению:

$$\frac{x}{2}O_2+(C_x+x39\ кал)=xCO+x68\ кал.$$

Если горение идет за счет кислорода из CO_2 или H_2O, то количество выделившегося тепла изменяется на величину теплоты диссоциации CO_2 или H_2O.

Как будет видно из дальнейшего, концепция Ауфгейзера относительно одинаковой реакционной способности углерода по отношению к CO_2, H_2O и O_2 и первичного образования при горении твердого углерода только CO не подтверждается современными исследованиями.

3. Теория комплекса. Ряд исследований указывает на одновременное образование при горении углерода (в качестве первичных продуктов), CO, CO_2 и твердого углеродно-кислородного комплекса C_xO_y, не имеющего определенного состава и в свою очередь разлагающегося на CO_2 и CO.

Природа комплекса не ясна. Это может быть адсорбированный (Рид и Уиллер) или растворенный (Л. Мейер, Хивонен, Эйкен) кислород или адсорбированная CO (Брум и Траверс).

Количество образующегося комплекса зависит от относительного количества газов и углерода, поверхности углерода, его реакционной способности, продолжительности соприкосновения, температуры и других факторов.

По теории Рида и Уиллера (1913) [44] углерод образует с кислородом CO_2, CO и физико-химический комплекс C_xO_y, связывающий несколько молекул углерода и кислорода. Комплекс является промежуточным соединением, разлагающимся на CO и CO_2. Отношение C к O непостоянно и меняется в зависимости от температуры, вида топлива и т. д.

Опыты Рида и Уиллера с циркуляцией воздуха над древесным углем показали, что при пропускании воздуха при 200—400° происходит поглощение кислорода, который не может быт выделен обратно с помощью одного вакуума.

Это свидетельствует о наличии не только физической адсорбции. Для разложения получающегося продукта требуются значительное количество тепла и вакуум и кислород выделяется обратно в виде CO и CO_2, причем для выделения большей части кислорода требуется температура около 900°.

В других опытах Рида и Уиллера [44] углерод, насыщенный кислородом, нагревался и над ним пропускался воздух с различной скоростью. Получающиеся газы анализировались. Количество кислорода, перешедшего в CO, представлено на рис. 13 для трех скоростей подачи воздуха. Кривые показывают температуры, при которых наиболее заметны реакции $2CO+O_2=2CO_2$ и $C+CO_2=2CO$.

Особенно интересны результаты для больших скоростей при температурах ниже 650°, так как в этих условиях вторичные реакции протекают в минимальной степени. Количество образовавшейся CO было слишком велико, чтобы быть продуктом восстановления CO_2. Возможность местного нагрева и обусловленная этим интенсивность восстановления была устранена результатами опытов с кислородом вместо воздуха. При этих условиях горячие точки были бы более заметны, тогда как скорость исчезновения O_2 не возросла. Первичным продуктом не могла быть и только CO вследствие малой скорости сгорания CO в интервале температур 250—400°. Исследователи пришли к выводу, что первичными продуктами диссоциации являются и CO и CO_2.

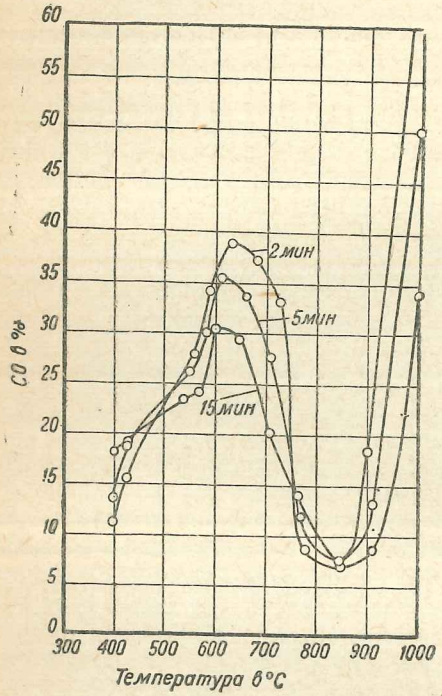


Рис. 13. Количество CO в газе (время прохождения 100 $см^3$ воздуха указано на кривых)

Лангмюр (1915) [18] исследовал взаимодействие кислорода с графитизированным в высокой степени углеродом при очень низком давлении. Он помещал раскаленную электрическим током угольную нить в кислород при давлении 0,004—0,007 *мм* и погружал реакционный сосуд в жидкий воздух. Вследствие малого давления и конденсации CO_2 на стенках сосуда Лангмюр избежал протекания вторичных реакций как в газовом пространстве ($CO+{}^1/_2O_2=CO_2$), так и на поверхности углерода ($C+CO_2=2CO$). Избежать реакции CO с углеродом было невозможно.

Лангмюр нашел, что при 950° C образуется CO_2, причем получающееся количество CO_2 не эквивалентно израсходованному кислороду, что свидетельствует об образовании сложного комплекса C_xO_y даже при высокой температуре. При 1470° образуется малое количество CO и при 1970° — большое, причем вплоть до 1970° при вакууме все еще имеется известное количество комплекса.

По Лангмюру комплекс C_xO_y при разложении дает только CO_2, а CO образуется при вторичной реакции CO_2 с углеродом:

$$C_x + yCO_2 = C_xO_y + yCO;$$

Условия образования комплекса углерода с различными газами исследовались Чагом (1929) [47].

В качестве адсорбента для кислорода, закиси и окиси азота, азота и окислов углерода применялись уголь, полученный из сахара,

и древесный уголь. Равновесие устанавливалось быстро во всех случаях, за исключением кислорода и окиси азота. При попытке регенерировать газы эвакуированием было найдено, что закись азота, азот и окислы углерода отделялись при 0° практически неизменившимися, но что лишь часть кислорода или окиси азота могла быть выделена при этой температуре.

Чагом установлено, что кислород удерживается углем в виде некоторого комплекса, который разрушается при 280°. Окись азота частично разлагается уже при 0°, причем кислород удерживается. Вторичные реакции между комплексом и окисью азота происходят при температуре ниже 150°, и даже при — 78° можно обнаружить удерживание кислорода и окиси азота. Предполагается, что окисление углерода является многофазным процессом, включающим в себя адсорбцию вследствие поверхностной конденсации, абсорбцию вследствие образования твердого раствора и сорбцию вследствие химической реакции.

Хивонен (1930) [48] изучал механизм реакции взаимодействия углерода с кислородом, пользуясь в основной части опытов методом Лангмюра, недостаток которого заключается в возможности протекания вторичной реакции при попадании CO на поверхность углерода. Во избежание этого Хивонен (в небольшом числе опытов) и впоследствии Л. Мейер пропускали через реакционный сосуд струю кислорода, двигающуюся с большой скоростью.

В результате опытов было установлено, что продуктами первичной реакции являются одновременно CO и CO_2.

По опытам Хивонена с ростом температуры содержание CO_2 в газе уменьшается. Так в струе кислорода получено:

800—1000° (вследствие сгорания CO в CO_2)	$P_{CO_2} : P_{CO}$ 2,2—1,8
1200°	0,45—0,37
1400°	0,23—0,17
1500—1600°	0,09—0,16
1700—1800°	0,25—0,50

Исследование Хивонена приводит Эйкена к выводам, что углерод образует комплекс порядка C_3O_4, разлагающийся на CO_2+2CO.

Согласно работам Бэкера и Хивонена, присутствие водяных паров значительно ускоряет реакцию. По Эйкену водяные пары препятствуют графитизации углерода, а по Ауфгейзеру — оказывают каталитическое воздействие на углерод.

Согласно исследованию Л. Мейера (1932) [49], пользовавшегося усовершенствованным методом Лангмюра, при взаимодействии графита с кислородом имеют место два типа первичных реакций: первый — при температурах ниже 1300° и второй — при температурах выше 1500° с переходной областью в интервале температур 1200—1600°.

При температурах ниже 1300° скорость горения графита пропорциональна давлению кислорода, что указывает на протекание реакции первого порядка. Отношение $\frac{CO_2}{CO}$, являющихся первичными продуктами реакции, равно единице и не зависит от температуры и давления.

При этих температурах графит обладает способностью в значительной степени растворять кислород, глубоко внедряющийся в кристаллическую решетку графита и находящийся повидимому в реакционноспособном состоянии.

Растворимость кислорода пропорциональна его давлению.

Полученным экспериментальным данным при температуре ниже 1300° удовлетворяет следующее уравнение:

$$4C + 3O_2 = 2CO_2 + 2CO.$$

По Мейеру 2 мол. кислорода из 3 доставляются за счет растворенного кислорода, а третья — из газообразной фазы.

Л. Мейер дает следующую схему механизма протекания реакции. Молекулы кислорода проникают в слой кристаллической решетки графита и удерживаются там остаточными валентностями углерода. Происходит растворение кислорода в графите. Расположение молекул растворенного кислорода по отношению к атомам углерода представлено на рис. 14.

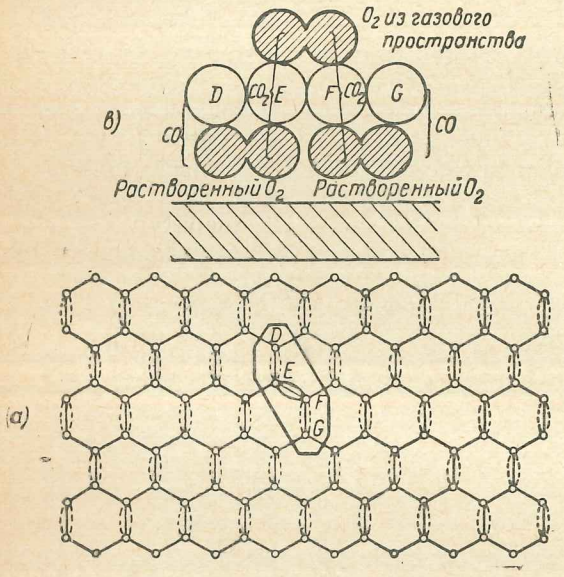


Рис. 14. Схема механизма протекания реакции горения графита по Л. Мейеру

При столкновении молекулы кислорода из газового пространства с комплексом $C-C$, незанятым кислородом (E—F), становится возможным протекание реакции

$$4C + 3O_2 = 2CO_2 + 2CO.$$

Взаимное расположение атомов углерода E и F с соседними атомами кислорода отвечает строению молекулы CO_2, а атомов D и G — строению молекулы CO. Эти четыре углеродных атома с двумя сорбированными и одной поступившей из газового объема молекулами кислорода выламываются из кристаллической решетки графита, давая две молекулы CO_2 и две молекулы CO.

При переходе ко второму типу реакции скорость горения графита значительно уменьшается. Уголь, раскаленный добела, при 0,05 *мм* O_2 сгорает в 40 раз медленнее, чем при красном калении.

Уменьшение скорости окисления графита объясняется уменьшением растворимости кислорода в графите с повышением температуры и постепенным переходом к медленно протекающей поверхностной

реакции. При температуре выше 1500° отношение $\frac{CO_2}{CO}$ постоянно, равно 0,5 и не зависит от температуры и давления. Это указывает на нулевой порядок реакции. Экспериментальным данным удовлетворяет следующее уравнение реакции второго типа:

$$3C + 2O_2 = CO_2 + 2CO.$$

По Эйкену кислород адсорбируется угловыми атомами углерода, и две адсорбированные молекулы кислорода реагируют с тремя атомами углерода.

Установленное Мейером уменьшение скорости сгорания углерода с повышением температуры противоречит данным обычной практики и объясняется ведением опыта при малых давлениях. При больших давлениях кислорода дополнительно протекает непосредственное окисление C в CO, скорость которого растет с температурой (см. ниже исследования Чуханова) и во всяком случае не уменьшается.

При исследовании, произведенном Мартином и Л. Мейером (1935) над воздействием кислорода на графитизированную нить при низком давлении и высокой температуре, были подтверждены предыдущие опыты, а именно: до 1500° К имеет место один тип реакции, выше 1800° К — другой. Расход O_2 при более низких температурах пропорционален давлению, т. е. идет реакция первого порядка. Отношение $\frac{CO_2}{CO}$ не зависит от температуры и давления и равно единице.

При более высоких температурах — реакция второго типа — выход не зависит от давления кислорода, т. е. реакция имеет нулевой порядок. Отношение

$$\frac{CO}{CO_2} = 2.$$

Энергия активации составляет для реакции первого типа 20 000—30 000 *кал* и второго типа—70 000 *кал*.

На основе описанных ниже исследований взаимодействия C с O_2 при разных скоростях, в том числе и очень больших (высокоскоростной метод исследования), проведенных М. К. Гродзовским и З. Ф. Чухановым, предложены следующие построения механизма реакции.

Чуханов принимает горение углерода одновременно по реакциям:

1) $2C + O_2 = 2CO$ (реакция горения),

и 2) через поверхностный комплекс C_3O_4

$$\left.\begin{aligned} &3C + 2O_2 = C_3O_4 \quad (а)\\ &C_3O_4 = 2CO + CO_2 \quad (б)\end{aligned}\right\}$$

или

$$\left.\begin{aligned} &3C + 2O_2 = C_3O_4 \quad (а)\\ &C_3O_4 + C + O_2 = 2CO + 2CO_2 \quad (в)\end{aligned}\right\}$$

реакция окисления

Окисление углерода при низкой температуре—до 700—800°С—протекает по реакциям (2а) и (2в) и при содержании O_2 в дутье более 5—10% лимитируется реакцией (а). Суммарно по кислороду процесс имеет порядок, близкий к нулевому. При концентрации O_2 ниже 5—10% зависимость от концентрации O_2 возрастает (уменьшается число ударов O_2) и процесс лимитируется также реакцией (в). Скорость окисления ввиду глубокого проникновения кислорода вглубь углерода не зависит от формы и размера частиц (в широких пределах), а пропорциональна их весу. Повышение скорости процесса вследствие реакции (1) происходит при атмосферном давлении выше 700—800° С.

При низком содержании O_2 ($< 1{,}5\%$) вследствие уменьшения числа ударов O_2 реакция (2в) лимитирует процесс, имеющий первый порядок и дающий CO и CO_2 в равных количествах.

Выше 1200° при низком парциальном давлении O_2 (Л. Мейер) скорость образования комплекса, реакции (2в) и процесса окисления в целом уменьшается и значение реакции (2б) увеличивается, и поэтому снижается порядок процесса и увеличивается количество CO. При 1500—1600° роль реакции (2в) сводится к нулю и процесс определяется реакцией (2б) нулевого порядка.

Скорость реакции (1) сильно растет с температурой и концентрацией O_2. Уже при 10% O_2 она заметна. При 42% O_2 и 1600° образование CO интенсивно и преобладает реакция (1).

По Гродзовскому первичным продуктом взаимодействия C с O_2 является CO.

При низких концентрациях O_2 механизм процесса следующий:

$$1)\ O_2\ (адс) \rightarrow O\ (адс) + O\ (адс)$$
$$2)\ 2C + 2O\ (адс) \rightarrow 2CO\ (адс)$$
$$3)\ 2CO\ (адс) + 2O_2\ (адс) + 2C \rightarrow 2CO_2 + 2CO$$

Реакция протекает медленно в три этапа и имеет нулевой порядок по кислороду. Этапы (1) и (2) начинаются при очень низких температурах. Выше 100—200° проявляет себя и этап (3). В полученных продуктах $CO : CO_2 = 1$.

С определенной концентрации O_2 при достаточно высокой температуре (700—800° С) процесс протекает в две стадии. Первая стадия вышеуказанная — хемосорбционная и вторая — непосредственное образование CO. Протекание второй стадии связано с первой и происходит в цепном порядке, скорость ее пропорциональна концентрации O_2 в степени 1,5.

Число актов первой и второй стадий соответствует числу зародышевых центров, вокруг которых происходит разрыв угольной решетки, ускоряющийся с увеличением концентрации O_2. Вторая стадия становится возможной за счет энергии, сообщаемой решетке в результате горения адсорбированной CO по этапу (3).

Первая стадия имеет определенный температурный коэфициент, малый для активных топлив и большой — для малоактивных.

Вторая стадия от температуры почти не зависит. Она значительно увеличивает расход кислорода и содержание CO в газе.

На активированном угле количество активных центров велико и при невысоком содержании O_2 в газе содержится много CO. При малоактивном угле для увеличения количества CO требуется или увеличение концентрации O_2 или скорости дутья.

При очень малом давлении O_2 (опыты Л. Мейера) протекает только первая стадия. До 1200° число активных центров относительно велико; процесс лимитируется подводом кислорода, реакция первого порядка, и $CO : CO_2 = 1$. При 1200—1600° процесс и отношение $CO : CO_2$ неустойчивы вследствие отмирания многих активных центров и «графитирования» углерода (при быстром сжигании «графитирование» происходит в малой степени, оно сказывается в случае высокотемпературной переработки). С 1600° малочисленность активных центров определяет нулевой порядок реакции и группировка адсорбированного O_2 определяет получение газа состава $2CO : 1CO_2$.

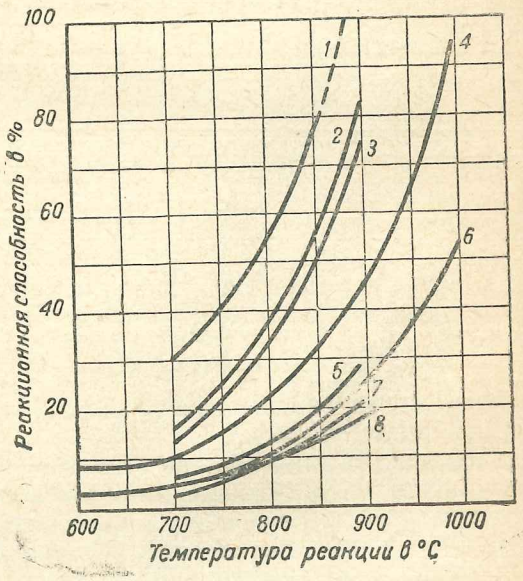


Рис. 15. Зависимость разложения CO_2 от каталитических добавок к коксу.

1 — K_2O — 15%, *2* — CaO — 5%, *3* — Fe_2O_3 — 10%, *4* — Fe_2O_3 — 5%, *5* — золы — 7%, *6* — чистый кокс, *7* — SiO_2 — 5%, *8* — Al_2O_3 — 5%

Нейман и фон-Ален [50] (1934) исследовали влияние неорганических добавок CaO, Fe_2O_3, K_2O, Al_2O_3, SiO_2, золы и колошниковой пыли на реакционную способность кокса, содержавшего 0,76% золы (рис. 15).

Добавки в количестве 5—15% хорошо перемешивались с углем. Коксование производилось при 900° в железной трубке диаметром в 6 *см*. Реакционная способность в отношении кислорода воздуха определялась в трубке диаметром в 18 *мм*; высота слоя кокса составляла 180 *мм*; размер зерен—1,2—1,6 *мм*. Окисление производилось воздухом. Реакционная способность вычислялась по формуле:

$$R = \frac{100\ (\%\ CO)}{\%\ CO + 2\ (\%\ CO_2)}.$$

Опыты показали, что наиболее сильное влияние оказывают щелочные окислы. При 700° С и добавке K_2CO_3 реакционная способность увеличилась в 7 раз, а при 900° равновесие совсем переместилось в сторону CO. Авторы считают, что каталитическое действие щелочных окислов основывается на переменном восстановлении и окислении металла:

$$K_2CO_3 + 2C = 2K + 3CO.$$
$$4K + O_2 = 2K_2O.$$
$$K_2O + C = 2K + CO.$$
$$2K + O = K_2O.$$

Добавка CaO сильно увеличивает реакционную способность кокса — при 900° более чем втрое. Механизм процесса авторы считают невыясненным. Добавка 5% Fe_2O_3 удваивает реакционную способность. Увеличение добавки Fe_2O_3 вдвое не удваивает реакционной способности, так как только часть его действует, как катализатор.

Каталитическому действию Fe_2O_3 авторы дают следующее объяснение.

Fe_2O_3 восстанавливается углеродом:

$$Fe_2O_3 + C = 2FeO + CO.$$

Образовавшаяся при реакции кокса с кислородом воздуха CO_2 окисляет железо при 700° в Fe_3O_4, а при 900° — в FeO:

$$Fe + CO_2 = FeO + CO.$$
$$3FeO + CO_2 = Fe_3O_4 + CO.$$

Окислы восстанавливаются углеродом до FeO или металла:

$$Fe_3O_4 + C = 3FeO + CO;$$
$$FeO + C = Fe + CO,$$

и процесс начинается сначала. Таким образом железо играет роль передатчика кислорода.

Добавки SiO_2 и Al_2O_3, по этим данным, понижают реакционную способность кокса, причем вторая — больше, чем первая. Добавка колошниковой пыли повышает реакционную способность, но в меньшей степени, чем чистая окись железа. Следовательно при совместном влиянии различных компонентов нельзя ждать аддитивности-так как компоненты связаны между собой, а не находятся в свободном состоянии. При добавлении золы увеличение реакционной способности не велико.

Исследование влияния физических факторов на механизм процесса получения воздушного газа

Исследование процесса горения углерода с точки зрения теории диффузии было произведено Нуссельтом, Бурке и Шуманом, Шориным, Блиновым, Тью, Дэвис и Хоттелом, Блиновым и Хайкиной и другими авторами.

Согласно современным представлениям о механизме сгорания углеродных частичек, скорость сгорания в основном определяется скоростью диффузии, изменяющейся в зависимости от толщины пограничного слоя, концентрации кислорода в нем и температуры. Роль давления заключается в изменении скорости подвода кислорода к поверхности частичек.

Концентрация кислорода на поверхности углерода при высоких температурах может быть лишь весьма незначительной вследствие

большой скорости реакций соединения углерода и кислорода. На скорость реакций оказывает влияние концентрация кислорода на внешней поверхности пограничного слоя.

В обычных условиях сжигания топлива диффузия протекает в условиях достаточно интенсивного движения газов, т. е. происходит вынужденная диффузия, зависящая от гидродинамического режима окружающей среды.

Нуссельт (1924) [51] вывел соотношение (для стационарного режима) между продолжительностью сгорания углеродного шарика и его начальным радиусом. Он исходил из следующих предположений: 1) кислород попадает на горячую поверхность путем диффузии, 2) скорость диффузии мала сравнительно со скоростью реакции кислорода с углеродом, 3) продуктом горения является CO_2 и 4) воздух, в котором сгорает углеродный шарик, неподвижен (естественная диффузия).

Нуссельт исходил из уравнения диффузии в форме:

$$V = DS\frac{dC}{dr},$$

где V — объем продиффундировавшего за единицу времени кислорода,
D — коэфициент диффузии кислорода,
S — поверхность шарика,
r — расстояние рассматриваемой точки от центра шара,
C — концентрация кислорода в газе.

Нуссельтом было получено следующее соотношение:

$$t = \frac{\beta\rho}{2C_0D_0} RT_m T_0^2 (r_0^2 - r^2),$$

где β — отношение веса кислорода к весу углерода в продуктах реакции,
ρ — плотность газа,
C_0 — концентрация кислорода в газе, выраженная в %,
D_0 — коэфициент диффузии кислорода при атмосферном давлении и 273° K,
R — газовая постоянная.

$$T_m = \frac{\ln T_1 - \ln T_2}{T_1 - T_2},$$

где T_1 и T_2 — температура поверхности шарика и газа в °K,
T_0 — 273°K,
r_0 — радиус шарика в начальный момент,
r_1 — радиус шарика в момент времени t.

Из приведенного выражения видно, что скорость сгорания сферических углеродных частичек в покоящемся газе не зависит от давления газа. Независимость от давления газа сгорания в неподвижном воздухе сферических частичек C в CO_2 была экспериментально подтверждена Венцелем.

Бурке и Шуман (1931) [52] предположили, что кислород не достигает поверхности углерода, а последний окисляется CO_2. По их пред-

ставлениям, образовавшаяся CO диффундирует наружу, сгорая по пути в CO_2, которая диффундирует в обоих направлениях.

Ими была вычислена скорость сгорания углеродных шариков при наличии свободной конвекции. Вместо принятия неподвижности газа, как сделал Нуссельт, ими было принято существование неподвижной пленки на поверхности углерода, толщина которой зависит от скорости потока и равна:

$$x = 2{,}0\left(2\,\frac{r\mu}{\rho w}\right),$$

где r — радиус шарика,
ρ — плотность газа,
w — скорость газа,
μ — коэфициент вязкости газа.

Получив выражение для количества кислорода, продиффундировавшего к поверхности шарика, и используя уравнение теплового баланса, они вывели выражение для удельной скорости K_s горения шарика:

$$\frac{K_s}{1{,}27\cdot 10^{-3}E} - \frac{1}{r} = \sqrt{\frac{Pw}{Ar}},$$

где E и A — величины, зависящие от температуры шарика и газа,
P — давление.

Тью, Девис и Хоттел (1934) [53] на основании теоретических рассуждений, исходя из предположения о возможности образования при горении углерода CO_2 и CO, вывели формулу для удельной скорости горения углерода в воздухе.

Они исходили из предположения, что кислород доставляется к поверхности горящего углерода путем диффузии и что скорость реакции между углеродом и кислородом пропорциональна парциальному давлению P_{os} кислорода у поверхности шарика и возрастает с повышением температуры по закону Аррениуса; горящий шарик окружен застойной пленкой. Приняв линейное распределение температур внутри пленки, они получили следующее выражение для удельной скорости горения:

$$K_s = \frac{12\,A\Phi P_{og}}{\dfrac{P_i}{\pi T^{n-1}\left[B\,\dfrac{(du\rho)^a}{dT^{\frac{a}{2}}}\right]} + C\sqrt{T_s}\;e^{\frac{E}{RT_s}}},$$

где K_s — удельная скорость горения в $г/см^2\ сек$,
A — фактор пропорциональности,
a, B и C — константы,
Φ — стехиометрический фактор: при образовании только CO_2 $\Phi = 1$; при образовании CO $\Phi = 2$; при одновременном образовании CO и CO_2 $2 > \Phi > 1$,
P_{og} — давление O_2 в газовом потоке, в am,

P_i — среднее логарифмическое давление инертных газов в газовом потоке в am,
n — число столкновений молекул газа $ммо/см^2\ сек$,
d — диаметр шара в $см$,
ρ — плотность газа в $г/см^3$,
T — средняя арифметическая температура пленки в °K,
T_s — температура поверхности углерода в °K,
E — энергия активации в $см^3\ am/моль\ O_2$,
R — газовая постоянная $см^3\ am/°\ K$,
u — скорость газа в $см/сек$.

Знаменатель уравнения содержит два слагаемых, первое из которых соответствует сопротивлению диффузии, а второе — химическому сопротивлению. Из рассмотрения уравнения следует, что

1) когда $\frac{E}{T_s}$ велико, то первое слагаемое мало по сравнению со вторым, и скорость реакции на поверхности является определяющим фактором, причем

$$K \cong \frac{\Phi\,P_{og}\,e^{\frac{-E}{RT_s}}}{\sqrt{T_s}};$$

2) когда $\frac{E}{T_s}$ мало, второе слагаемое мало и следовательно диффузия является определяющим фактором:
при относительно большом d:

$$K \cong \frac{\Phi P_{og}\,\pi T^{n-1-\frac{a}{2}}(du\rho)^a}{P_i d};$$

при относительно малом d:

$$K \cong \frac{\Phi P_{og}\pi T^{n-1}}{P_i d}.$$

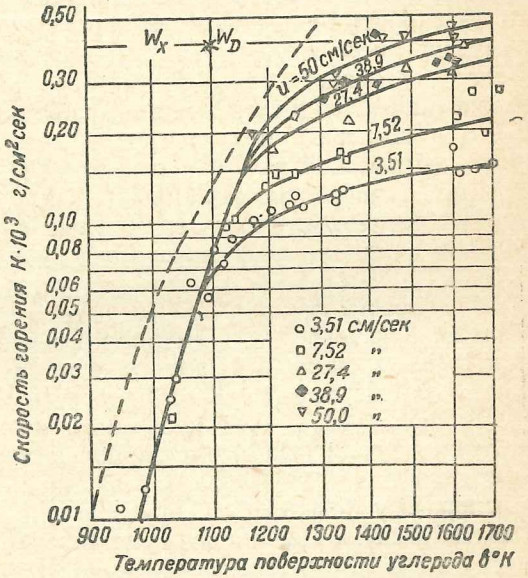


Рис. 16. Скорость горения углерода в смеси азота и кислорода в зависимости от температуры углерода и скорости движения газов: w_D — сопротивление диффузии, w_x — сопротивление химических реакций (пунктирная линия дает расчетную скорость горения при сопротивлении диффузии, равном нулю)

Авторами были произведены опыты по сжиганию углеродного шарика в вынужденном потоке (рис. 16).

Тью, Дэвис и Хоттел [54] исследовали горение шаров из щеточного угля с содержанием золы в 0,17% и диаметром в 2,5 $см$ в различных смесях азота и кислорода. Шары подвешивались в печи в тонких фарфоровых трубках.

Так как по Бурке и Шуману замена CO_2 в окружающей среде на O_2 эквивалентна лишь удалению внешней части оболочки и ничего

не меняет в ходе процесса, то при пропускании над углеродом смеси газов, состоящей из N_2 и O_2, должен был бы получиться тот же эффект, что и при пропускании смеси N_2 и CO_2. Однако вид кривой удельной скорости горения в обоих случаях оказался совершенно различным. Отсюда авторы делают вывод о непригодности гипотезы горения углерода в воздухе только за счет восстановления CO_2.

Анализируя опытный материал, авторы делают вывод, что ниже 1100° К скорость сгорания шариков лимитируется скоростью реакции и не зависит от скорости газа, а при более высоких температурах фактором, определяющим скорость реакции, является диффузия кислорода.

Авторы считают для a наиболее вероятным значение 0,4.

Исследование показало также следующее:

1) скорость реакции находится в линейной зависимости от содержания O_2 в окружающей среде как в том случае, если диффузия является определяющим фактором, так и в случае, если определяющим фактором является реакционная способность поверхности топлива, что находится в соответствии с теорией;

2) скорость горения в температурном интервале, где решающее значение имеет диффузия, изменяется пропорционально массовой скорости газа (массе газа в единицу времени) в степени 0,4—0,7, что также находится в согласии с разработанной теорией;

3) в температурном интервале, где определяющей является скорость химической реакции, скорость горения удваивается на каждые 15° (при температуре около 1050° К);

4) в температурном интервале, где определяющей является диффузия, скорость горения изменяется приблизительно пропорционально $T^{0,6} - T^{1,1}$, находясь в пределах, установленных теорией;

5) скорость горения по абсолютной величине приближается к величине, определяемой теоретически, насколько это вообще возможно, так как последняя величина зависит от не вполне точно определяемой толщины пленки.

Блинов (1935) [55], основываясь на тех же предпосылках, что Хоттел, Девис и Тью (что кислород доставляется диффузией к поверхности шарика и что скорость реакции пропорциональна концентрации кислорода у поверхности горящего тела), вывел следующую формулу, охватывающую, как и в формуле Тью, Девиса и Хоттела, диффузионную и химическую сторону явления:

$$t = \frac{\beta\rho}{C_0}\left[\frac{1}{1{,}07\, v_0^{0,4}\, D^{0,6}}\left(r_0^{1,6} - r^{1,6}\right) + \frac{1}{K_1}\left(r_0 - r\right)\right],$$

где t — время реакции,

β — постоянный множитель, аналогичный величине Ф в формуле Тью, Девиса и Хоттела и равный отношению весов кислорода и углерода, вступающих в соединение, т. е. β определяется характером продуктов, получающихся при горении: при получении только CO $\beta = 1$, при получении только CO_2 $\beta = 2$; при одновременном получении CO и CO_2 β имеет промежуточные значения,

ρ — плотность газа,

C_0 — концентрация кислорода,

v_0 — скорость газа,

D — коэфициент диффузии,

r_0 — радиус шарика в начальный момент времени,

r — то же в момент времени t,

K_1 — константа скорости реакции.

Формула Блинова содержит константу скорости реакции, концентрацию кислорода, скорость газа и коэфициент диффузии. При большом K_1 (высокие температуры) вторым членом выражения можно пренебречь, и формула представит собой уравнение диффузии в вынужденном потоке.

В опытах Блинова шарик из электродного угля с минимальным содержанием золы помещался в кварцевой трубке, нагревавшейся в вертикальной электрической печи. Через трубку продувалась смесь азота и кислорода в разных соотношениях. Вес шарика определялся на микровесах.

Исследования при различных содержаниях кислорода в смеси и различных скоростях показывают, что воспламенение шарика начинается при 740—760° С. До воспламенения протекает медленный окислительный процесс, скорость которого возрастает с повышением температуры и концентрации кислорода в газе. При 740—760° температура шарика резко повышается, вес быстро убывает и появляется синее пламя, в дальнейшем ослабевающее.

Появление при воспламенении угля пламени объясняется образованием CO наряду с CO_2. Количество CO растет с температурой; при 740—760° количество ее достаточно для воспламенения.

Повышение содержания кислорода сильно увеличивало скорость сгорания и температуру шарика. С увеличением скорости газа шарик сгорал быстрее, причем при малых скоростях газа нарастание скорости сгорания значительнее, чем при больших. Температура шарика при изменении скоростей газа мало изменялась.

На основе исследования установлено, что кислород доставляется к поверхности горящего тела диффузией и что скорость реакции пропорциональна давлению кислорода у поверхности тела; кроме того автор делает вывод об одновременном образовании в качестве продуктов реакции CO и CO_2.

Блинов и Хайкина (1935) [56] изучали влияние давления на скорость сгорания углеродных шариков диаметром около 5 *мм*. Температура печи составляла 750° С; воздух при опытах не высушивался; скорость воздуха в печи, отнесенная к 750°, колебалась в пределах 2—41,6 *см/сек*; опыты проводились при разных линейных скоростях газа при давлении в 1—7 *am*.

Протекание процесса сгорания характеризовалось путем определения веса шарика в течение опыта.

Согласно опытам установлено:

1. Скорость сгорания углеродной частицы возрастает с увеличением линейных скоростей газа, и с повышением давления, но при одной и той же массовой скорости газа (т. е. массе газа в единицу

времени) давление практически не изменяет скорости процесса в изученной области.

2. Если за меру скорости сгорания принять скорость K изменения во времени поверхности S сферической частицы

$$K = \frac{dS}{dt}, \text{ то}$$

$$K = K'_0 (Pw)^{0,4} + K',$$

где P — давление газа в *ата*,

w — линейная скорость газа,

K'_0 и K' — коэфициенты, не зависящие от скорости и давления.

Эффект давления зависит от скорости w и в покоящемся воздухе повидимому равен нулю.

3. В изученной области фактором, лимитирующим скорость сгорания, является скорость поступления кислорода к горящей поверхности.

Блиновым и Хайкиной также было установлено, что при горении углерода получается одновременно CO и CO_2; в этих опытах механизм реакции соответствует уравнению, установленному Мейером:

$$4C + 3O_2 = 2CO + 2CO_2.$$

Возможно, что это соотношение не вполне точно ввиду охвата опытами сравнительно небольшого диапазона скоростей газа и сгорания части CO у самого угольного шарика.

Авторы пришли к выводу, что путь интенсификации процесса лежит в увеличении скоростей поступления кислорода к горящей поверхности.

В работе Девиса и Хоттела (1934 [54]) были созданы условия, при которых диффузия являлась определяющим фактором. Толщина газового слоя, через который должна проходить диффузия, точно контролировалась. Для этой цели из щеточного углерода и древесного угля изготовлялись диски, помещавшиеся на дне силлиманитового цилиндра, подвешенного в печи на пути потока воздуха и связанного с весами. После изучения влияния скорости воздуха для опыта была принята скорость в 5,32 *см/сек* при 0° и 1 *ат*.

Исследования Девиса и Хоттела показали, что скорость горения при данном пути для диффузии кислорода понижается с увеличением степени графитизации углерода. Это объясняется тем, что для окисления одинакового количества углерода требуются различные количества кислорода в случае древесного угля и щеточного углерода вследствие того, что соотношение $\frac{CO}{CO_2}$, образующихся на поверхности древесного угля, меньше соотношения $\frac{CO}{CO_2}$, образующихся на поверхности щеточного углерода.

Фотографии, сделанные с горящих шариков, обнаружили существование зоны вокруг них, в которой CO сгорает за счет диффундирующего в противоположном направлении кислорода. Указанная зо-

на—корона—имеет голубую окраску, характерную для горения CO. На одной из фотографий была выявлена темная зона между углеродом и короной, что объясняется следующим.

При сгорании углерода за счет кислорода на поверхности образуются CO и CO_2. В опытах, где диффузия определяет скорость горения, концентрация кислорода на поверхности углерода очень мала; поэтому сгорание CO в CO_2 происходит очень медленно в газовой фазе и почти не происходит вблизи поверхности углерода. Диффундирующая наружу CO достигает наконец такой зоны, где концентрация кислорода достаточна, чтобы сжигание CO могло происходить со скоростью, качественно определяемой толщиной короны.

А. Паркер и Х. Хоттел (1936) [57] изучали скорость горения щеточного углерода. Образец цилиндрической формы (диаметром 2,5 *см*) с концом, имеющим форму полушара, помещался в цилиндрическую печь, через которую пропускался нагретый воздух. Отбор пробы производился с помощью капиллярной трубки, заполненной ртутью и приводимой в соприкосновение с образцом.

Скорость горения углерода выражалась в граммах на 1 $см^2$ его поверхности.

В результате исследований было установлено следующее:

а) При температуре 1156—1159° K и скорости воздуха 3 *см/сек* парциальное давление O_2 на поверхности углерода составляет около 0,05 *ат*, возрастая с увеличением расстояния от поверхности, и составляя на расстоянии около 0,8 *см* от поверхности примерно 0,19. Парциальное давление CO_2 на поверхности углерода составляет 0,17 *ат* и постепенно снижается с увеличением расстояния — примерно 0,01 *ат* на расстоянии 0,8 *см*.

б) При различных скоростях воздуха парциальное давление O_2 на поверхности падает с повышением температуры (не прямолинейная зависимость). При температуре ниже 1000° K парциальное давление O_2 у поверхности углерода — P_{os} приближается к величине 0,21, а при высоких температурах стремится к нулю. При данной температуре концентрация кислорода на поверхности возрастает с увеличением скорости окружающего воздуха.

в) При различных скоростях воздуха скорость горения возрастает с повышением температуры (зависимость не прямолинейная). При данной температуре скорость горения тем больше, чем больше скорость воздуха, причем эта разница возрастает для более высоких температур.

г) Зависимость

$$\lg \frac{10^3 K \sqrt{T_s}}{P_{os}} \text{ от } \frac{10^3}{T_s}$$

(для разных скоростей) выражается прямой линией в случае принятия, что на поверхности углерода практически не содержится CO (как это показали анализы). Это — прямолинейная зависимость отвечающая закону, действительному для гетерогенных реакций. В случае принятия, что на поверхности образуется только CO вместо прямой линии, соответственно различным скоростям получается семейство кривых.

д) Логарифмическая зависимость скорости горения, отнесенной к единице изменения парциального давления по глубине оболочки ($0{,}21 - P_{os}$) при данной температуре, от скорости окружающего воздуха выражается прямыми линиями, наклон которых равен 0,37. Скорость горения для каждой температуры повышается с увеличением скорости окружающего воздуха.

Авторы вывели следующую формулу для удельной скорости горения щеточного углерода:

$$10^3 K = \frac{P_{og}}{\dfrac{1}{0{,}032\, AP\sqrt{T_s}\left[\dfrac{117}{dT_s^{0,185}}\sqrt{(du_0P_0)^{0,37}}+\dfrac{2}{d}\right]}+\dfrac{P_{og}}{+1{,}05\cdot 10^{-10}\sqrt{T_s}\, e^{\frac{44\,000}{RT_s}}}},$$

где $$A = \frac{D'_{ON}D'_{CN}}{PD'_{ON} - P_{NG}(D'_{ON} - D'_{CN})} = \frac{0{,}0247}{0{,}178\ P - 0{,}039\ P_{NG}} = 0{,}168$$

для воздуха при 1 *am* ($см^2\ сек^{-1}\ am^{-1}$),

D'_{ON}, D'_{CN} — скорость диффузии O_2 и CO_2 через N_2 при 273° К ($см^2/сек$),

P — общее давление газов (am),

P_{NG} — парциальное давление N_2 в окружающих газах (am),

u_0 — скорость газа ($см/сек$),

остальные обозначения см. в формуле Тью, Девиса и Хоттела.

Знаменатель уравнения состоит из двух слагаемых, из которых первое представляет сопротивление диффузии, а второе — химическое сопротивление. С повышением температуры второе становится относительно менее важным. С повышением скорости первое становится незначительным. С увеличением размера частицы величина $\frac{2}{d}$ становится незначительной.

Данные, вычисленные по уравнению, совпадают в пределах ошибок опыта с экспериментальными данными Тью, Девиса и Хоттела.

Для сжигания пылевидного топлива, авторы вывели формулу для времени горения частицы топлива. При высоких температурах и малых размерах частицы топлива, выведенная ими формула имеет вид:

$$10^3 K = \frac{0{,}0109\, P_{og}\, T_S^{0,5}}{d}$$

Эта формула относится к горению изолированной частицы в воздухе при давлении в 1 *am* и при образовании только CO_2. Соответственное преобразование формулы дает выражение для времени сгорания (Θ сек.) в зависимости от плотности частицы (z $г/см^3$), температуры

(T_s ° К) и начального диаметра (d_0 $см$) для случая неограниченного избытка воздуха:

$$\Theta = \frac{1{,}09\cdot 10^5\, z d_0^2}{T_s^{0,5}}.$$

В случае определенного избытка воздуха (ε) формула имеет вид

$$\Theta = \frac{7{,}3\cdot 10^4\cdot z\cdot d_0^2\,(1+\varepsilon)}{\varepsilon^{\frac{1}{3}}\, T_s^{0,5}}\left[\frac{1}{2}\ln\frac{\varepsilon^{\frac{2}{3}} - \varepsilon^{\frac{1}{3}} + 1}{(\varepsilon^{\frac{1}{3}}+1)^2} + \sqrt{3}\left\{\operatorname{tg}^{-1}\frac{\left(\frac{2}{\varepsilon^{\frac{1}{3}}} - 1\right)}{\sqrt{3}} + \frac{\pi}{6}\right\}\right]$$

Авторы делают следующие выводы по работе:

1. Для температур, достигаемых при некоторых видах промышленного использования твердого топлива, при выражении скорости горения в зависимости от диффузии кислорода к поверхности нельзя не учитывать концентрацию кислорода на поверхности.

2. Диффузия CO_2 и O_2 через N_2 изменяется пропорционально $T^{1,5}$.

3. При высокой температуре на поверхности щеточного углерода образуется очень мало CO по сравнению с CO_2.

4. Скорость горения щеточного углерода, отнесенная к единице «интенсивности диффузии», пропорциональна скорости окружающего газа в степени 0,37.

В опытах Паркера и Хоттела происходило сгорание образующейся CO за счет свободного O_2, что следует учитывать при оценке выводов.

Ряд исследований влияния на окисление углерода гидродинамики потока был проведен в последнее время физико-технической лабораторией Всесоюзного теплотехнического института. Исследования производились путем сжигания отдельных угольных частиц и прямого углеродного канала и результаты их распространялись и на случай горения в слое.

При малых скоростях обтекания отдельных частиц (скорость 0,18—1,0 *м/сек*) и ламинарном потоке горение частицы происходит равномерно и сохраняется ее сферическая форма. Частица окружена тонкой пленкой пламени CO. При больших скоростях струи (1,0—37,0 *м/сек*) происходит срыв струи. Лобовая часть частицы горит быстро и пленка горящей CO с этой стороны отсутствует; тыльная часть почти не участвует в горении. При ламинарном движении газов в угольном канале («ламинарное горение») скорость выгорания меняется со скоростью дутья в незначительной и все уменьшающейся степени до перехода к турбулентному режиму. В переходной области (скорости соответствующие $Re = 2000—3000$) вначале скорости выгорания не имеют устойчивых значений. При установившемся турбулентном движении («турбулентное горение») скорость горения имеет устойчивые значения, большие, чем при

ламинарном режиме, и растущие со скоростью дутья почти линейно и практически неограничено.

Продуктом «ламинарного горения» является CO_2 и «турбулентного» — также CO в возрастающем со скоростью дутья количестве.

Обработка данных по горению сферических частиц в широком интервале скоростей обтекания (до 37 *м/сек*) и при различных концентрациях O_2 в дутье дает следующую зависимость:

$$Nu_{диф} = ARe^{0,5},$$

$$Nu_{диф} = \frac{\alpha_{диф} d}{D},$$

где $\alpha_{диф}$ — количество кислорода, подведенного к частице в единицу времени при разности концентраций, равной 1.

d — диаметр частицы,

D — коэфициент диффузии,

A — коэфициент.

При скоростях меньших 4,8 *м/сек* наблюдаются отклонения от данной зависимости.

Для «ламинарного горения» в трубке подвод кислорода определяется соотношением:

$$Nu_{диф} = -\frac{1}{4} Pe \frac{d}{l} \ln \frac{(O_2)_l}{(O_2)_0}$$

или полуэмпирическими зависимостями, пригодными для начальных участков:

$$Nu_{диф} = 1{,}66 \left(Pe_{диф} \frac{d}{l} \right)^{0,318}$$

$$Nu_{диф} = 1{,}56 \left(Pe_{диф} \frac{d}{l} \right)^{1/3}$$

где $Pe_{диф}$ — критерий Пекле для диффузионной задачи,

$(O_2)l$ и $(O_2)_0$ — концентрация O_2 на расстоянии l и в начале канала,

d — диаметр канала.

При «турбулентном горении» подвод кислорода определяется соотношением

$$Nu_{диф} = 0{,}119 \frac{St_{диф}}{St_{диф} + 2} Re^{0,75},$$

где $St_{диф}$ — аналогичен критерию Стантона и равен $\frac{\nu}{D}$, где ν — кинематическая вязкость.

Высота зоны полного расходования кислорода при турбулентном режиме мало зависит от скорости дутья и равна

$$L = Aw^{0,25} \cdot d^{1,25}.$$

Вынос CO, происходящий при турбулизации потока, уменьшается с продолжительностью пребывания CO в кислородной зоне. Пользуясь методами теории фильтрации и распространяя результаты исследований и расчетов на слой, возможно подсчитать время пребывания газов в кислородной зоне слоя и состав газа при кусках различной крупности и различных скоростях.

Из этих данных следует, что крупно-кусковое топливо дает газ худший по составу, чем мелкое.

Исследования процесса газификации на воздушном дутье

Выяснение сущности явлений, протекающих при процессе газификации, имеет огромное значение, так как только знание механизма процесса может дать возможность достигнуть большой эффективности процесса.

До самого последнего времени относительно малая производительность газогенераторов обосновывалась физико-химическими требованиями полноты протекания реакции восстановления CO_2. Вводилось требование или поддержания в зоне газификации максимально возможных температур (генераторы с жидким шлакоудалением), позволявших значительно интенсифицировать процесс, или же достаточного обтекания углерода CO_2, что лимитировало производительность газогенераторов. В противоречии с этими требованиями были результаты работы механических газогенераторов, в которых слой топлива перемешивается специальным шурующим приспособлением (мешалка Чапмана, лом и шахта Вельмана, скребок и шахта Моргана), а также генераторов Винклера, в которых слой топлива находится в интенсивном движении, дающих хорошие результаты по газификации, несмотря на большую интенсивность работы.

С другой стороны, получение хороших результатов при газификации в интенсивном потоке газов нельзя было приписать большой интенсивности дутья, доказательством чему можно было привести результаты работы генераторов водяного газа в периоды горячего воздушного дутья. Часто при большой интенсивности дутья в получаемых продуктах велико содержание CO_2 и невелико содержание CO, что, казалось, подтверждало необходимость достаточного контакта для разложения CO_2.

Новейшие исследования, правда, недостаточно полно освещающие механизм процесса и в известной степени противоречивые, все же с достаточной определенностью позволяют отвергнуть старые представления о процессе и требованиях к режиму и наметить другие требования, основывающиеся на большем знании сущности явления.

Особенно важным является то, что новая теория процесса позволяет наметить пути к интенсификации процесса и использованию низкосортных мелких и разрушающихся топлив.

Ряд исследований процесса окисления углерода производился в условиях, близких к условиям протекания процесса в газогенераторах. Целью этих исследований являлось не изучение влияния отдельных факторов на элементы процесса, а изучение влияния совокупности факторов на процесс газификации в целом.

В табл. 14 приведены данные Вендта (1905) [58], исследовавшего изменение состава газа из каменного угля по высоте генератора. Эти данные показывают, что при воздушном дутье (опыты, помеченные цифрой I) и высокой температуре содержание CO_2 в газе на высоте 250 *мм* ничтожно и что уже в начале соприкосновения воздуха и топлива в газах содержится наряду с CO_2 и CO.

Таблица 14

Изменение состава газа и температуры по высоте генератора по опытам Вендта

Высота над решеткой в *мм*	CO_2 (в %)		CO (в %)		H_2 (в %)		N_2 (в %)		Температура (в °C)	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
Газопровод	0,7	5,3	31,3	26,0	6,3	14,6	59,3	49,7	580	440
1500 . . .	1,0	5,3	28,9	28,0	9,8	19,0	58,3	43,6	1030	—
1250 . . .	0,6	6,0	30,0	28,3	11,7	20,7	57,1	40,2	—	810
1000 . . .	0,4	5,0	33 4	28,7	2,4	21,8	63,5	39,5	1250	—
750 . . .	—	3,0	34,5	32,7	0,4	17,9	65,1	45,2	—	925
500 . . .	0,2	5,5	34,3	28,0	—	13,7	65,5	51,9	—	—
250 . . .	0,2	9,3	34,1	22,0	—	10,8	65,7	57,5	1400	1100
0 . . .	15,0	11,4	9,7	—	—	—	75,3	79,1	—	—

Следы смоляных паров были обнаружены на высоте 1000 *мм*, что указывает на начало зоны сухой перегонки.

Исследования Неймана (1913) [59] (табл. 15), газифицировавшего кокс в небольшом опытном генераторе (диаметром в 0,47 *м*) и анализировавшего газ, взятый на различных уровнях слоя топлива, показывают, что уже на высоте 165 *мм* (а возможно и ниже) содержание в газе CO_2 не велико и что с увеличением производительности генератора содержание CO_2 на одном и том же уровне уменьшается.

При опытах Неймана и Вендта замечалось некоторое увеличение содержания CO_2 в газе в верхней части генератора с уменьшением содержания CO, что может быть отнесено за счет прогорания генератора у стен, разложения некоторого количества CO и взаимодействия водяного пара с углеродом и CO.

Исследованиями Неймана над составом газа в различных частях сечения было установлено, что получаемый у стен «периферийный» газ оказывает тем большее влияние, чем меньше нагрузка, т. е. увеличение производительности способствует более равномерному распределению газов. По этим данным при чисто воздушном дутье и достаточной нагрузке в зоне высоких температур практически достигается равновесие Будуара.

Факт получения в генераторе большого количества CO в самых низких слоях зоны газификации подтверждается также упомянутым выше исследованием Бэлла, обнаружившим в области фурм доменной печи большое количество CO и малое — CO_2.

Приведенные в главе II данные о работе генераторов с выпуском жидкого шлака свидетельствуют о том, что, несмотря на высокую производительность и следовательно малую продолжительность обтекания топлива газами, в газе содержится большое количество CO (33,3%) и малое — CO_2 (0,5%). Возможно, что интенсивное разложение CO_2 связано с высокой температурой зоны газификации в генераторах с выпуском жидкого шлака, но во всяком случае при имеющихся условиях высокая производительность не препятствует получению газа с малым содержанием CO_2 и высоким CO.

В газогенераторах Винклера (см. гл. II), несмотря на большую интенсивность дутья, во много раз превышающую обычную, при относительно низкой температуре зоны газификации (< 1100°) газ содержит сравнительно небольшое количество CO_2 и большое CO (например при буром угле: CO_2 — 5% и CO — 24%).

Большой интерес представляют опыты, проведенные в Государственном институте азота Гродзовским и Чухановым [60, 61], газифицировавшими в опытных обращенных генераторах на воздушном и парокислородном дутье древесный уголь и кокс с размером зерен до 5 *мм*. Генераторы представляли собой трубки из кварца или шамота диаметром в 20 и 80 *мм*. При опытах наблюдались размер и перемещение раскаленной зоны, видимой на-глаз и названной авторами исследования зоной горения, состав дутья и позонно — газа, температуры в слое, количества дутья и т. д. Интенсивность газификации определялась по движению зоны, количеству дутья и составу дутья и газов.

Исследователи нашли, что к концу раскаленного слоя содержание в газе кислорода практически равно нулю, что при первом контакте дутья с углем, обладающим активной поверхностью, независимо от содержания кислорода в дутье получается весьма значительное количество CO и что с увеличением скорости дутья содержание CO в газе растет. Отмечая малую скорость реакции

$$C + CO_2 = 2CO,$$

исследователи приходят в выводу, что в реакционной зоне протекают одновременно две реакции:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 \text{ и } C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO.$$

Изменяя содержание кислорода в дутье, исследователи нашли, что при малых скоростях, большем содержании кислорода и более высокой температуре газификации активированного угля на образование CO_2 расходуется кислорода больше, чем в случае более низкой температуры и при меньшем содержании в дутье кислорода, но при большей скорости. Вместе с тем с увеличением содержания в дутье кислорода при одной и той же скорости газа содержание CO в газе растет. Из этого авторы делают вывод, что CO_2, образующаяся при малой скорости газов, является результатом горения CO и что по достижении определенной скорости эта реакция с увеличением скорости дутья протекает все в меньшей степени. Авторы делают следующее предположение.

Таблица 15

Зависимость процесса газификации от интенсивности дутья и добавки пара

№ опыта	Отверстие [1]	Количество газа: сухого 15° (в м³/час)	Количество газа: водяного пара 15° (в м³/час)	Степень разложения пара	Температура (в °С)	Состав газа: CO_2	CO	H_2	CH_4	H_2O	N_2	$K_{опыт}$	$K_{выч}$	Низшая теплотворная способн. газа (в кал/м³) (15°)	Количество пара (в кг/час)	Количество воздуха (в м³/сек)
1	—	58,5	34,5	0,000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	25	59,6
	2	82,5	26,6	0,230	1090	0,0939	0,1171	0,1210	0,0008	0,2440	0,4232	2,53	4,95	822		
	3	85,1	24,2	0,300	970	0,0935	0,1215	0,1392	0,0016	0,2210	0,4232	2,06	1,51	885		
	4	90,2	21,9	0,365	850	0,0838	0,1601	0,1465	0,0024	0,1950	0,4122	2,32	1,09	1003		
	5	95,0	19,6	0,433	690	0,0845	0,1790	0,1590	0,0033	0,1710	0,4032	2,28	0,58	1078		
	Газопровод	86,3	24,2	—	410	0,0977	0,1298	0,1312	0,0047	0,2197	0,4169	2,22	—	908		
6	—	146,7	33,7	0,000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	25	148,9
	2	203,9	16,8	0,500	1300	0,0720	0,2066	0,1181	0,0009	0,0763	0,5261	1,85	2,71	937		
	3	213,7	14,8	0,560	1150	0 0579	0,2421	0,1252	0,0019	0,0648	0,5081	2,16	2,16	1057		
	4	216,0	12,8	0,620	990	0,0340	0,2837	0,1171	0,0028	0,0530	0,5064	3 98	1,58	1156		
	5	216,0	10,8	0,680	820	0,0286	0,2980	0,1104	0,0028	0,0476	0,5116	4 49	0,98	1181		
	Газопровод	211,2	12,7	—	510	0,0595	0,2418	0,1190	0,0057	0,0556	0,5184	1,90	—	1061		
7	—	36,0	18,1	0,00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	12,5	36,8
	2	49,6	14,5	0,20	1120	0,0881	0,1168	0,1212	0,0023	0,2260	0,4456	2,47	2,05	720		
	3	51,2	12,7	0,30	1000	0,0938	0,1300	0,1293	0,0045	0,1990	0,4434	2,13	1,62	872		
	4	54,2	10,7	0,41	800	0,0993	0,1510	0,1419	0,0050	0,1650	0,4378	1,77	0 91	955		
	5	58,0	8,9	0,51	590	0,1049	0,1741	0,1560	0,0069	0,1330	0,4251	1,42	0,35	1051		
	Газопровод	49,8	14,7	—	350	0,1049	0,1095	0,1102	0,0062	0,2240	0,4452	2,14	—	797		
12	—	145,0	19,2	0,00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	12,5	148,3
	2	195,0	8,45	0,56	1290	0 0411	0,2584	0,0919	0,0029	0 0415	0,5642	2 84	2,68	1005		
	3	201,1	5,76	0,70	1180	0,0331	0 2870	0,0933	0,0049	0,0279	0,5638	2,59	2,27	1091		
	4	208,5	3,07	0,84	1020	0,0276	0,3158	0,0946	0,0059	0,0145	0 5416	1,75	1,69	1169		
	5	216,4	0,38	0,98	850	0,0210	0,3332	0,1019	0,0080	0,0018	0,5341	0,29	1,09	1200		
	Газопровод	201,9	11,4	—	550	0,0340	0,2720	0,0945	0,0076	0,0543	0,5376	4,60	—	1105		
15	—	96,7	1,53	0,000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,0	98,2
	2	113,5	0,851	0,444	1320	0,0467	0,2591	0,0149	0,0040	0,0075	0,6678	2,78	2,78	796		
	3	116,6	0,404	0,736	1200	0,0219	0,2969	0,0199	0,0050	0,0034	0,6529	2,35	2,35	922		
	4	119,8	0,134	0,876	1030	0,0100	0,3248	0,0210	0,0060	0,0011	0,6371	1,73	1,73	1007		
	5	120,3	0,066	0,957	830	0,0080	0,3249	0,0220	0,0070	0,0005	0,6376	1,02	1,02	1025		
	Газопровод	116,0	2,3	—	460	0,0343	0,2717	0,0245	0,0049	0,0202	0,6444	6,60	—	873		

[1] Высота отверстий над решеткой (в мм): 1 — 40; 2 — 165; 3 — 290; 4 — 415;

С кислородом углерод способен давать и CO_2 и CO, но, в то время как скорость реакции образования CO_2 мало зависит от состояния поверхности углерода, скорость образования CO резко возрастает с разрыхлением поверхности углерода вследствие выбивания углеродных атомов из решетки при реакции образования CO_2 и других реакциях, а также при действии высокой температуры. Однако активность углерода и высокая температура неспособны в результате газификации обеспечить максимальный выход CO, если не соблюдается условие быстрого выведения CO из раскаленной зоны во избежание протекания реакции

$$CO + \frac{1}{2}O_2 = CO_2.$$

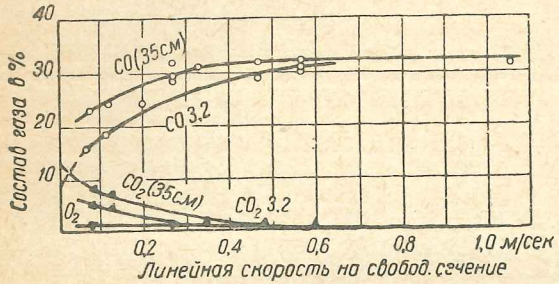


Рис. 17. Зависимость процесса газообразования от линейной скорости воздуха для активированного древесного угля

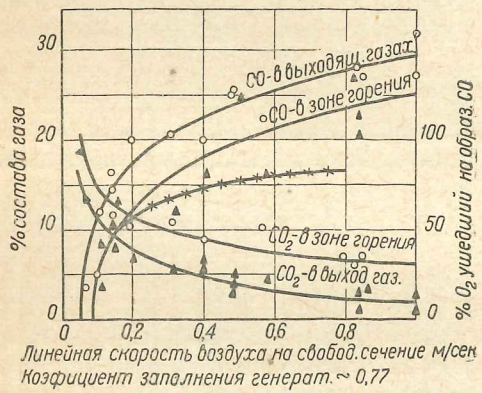


Рис. 18. Зависимость процесса газообразования от линейной скорости воздуха для кокса

В условиях опытов с активированным углем практически полная газификация происходила при скорости в 0,2—0,3 *м/сек* и выше, а в опытах с коксом — лишь начиная со скорости выше 1 *м/сек* (считая на холодное дутье и полное сечение трубки), что авторами объясняется необходимостью «активации» кокса путем увеличения количества O_2, подаваемого в единицу времени. После достижения скорости, необходимой для вывода CO без сгорания из реакционной зоны, с увеличением содержания O_2 в дутье увеличивается часть кислорода, затрачиваемая на образование CO. Это свидетельствует о большой скорости взаимодействия кислорода с углеродом, если обеспечена его высокая активность. До достижения какой-то предельной скорости, как указывают авторы, продуктом газификации является только CO_2.

На рис. 17 и 18 приведены данные состава газа по выходе из слоя активированного угля (малая трубка) и из кокса — при выходе из зоны горения и слоя (большая трубка).

При опытах реакционная зона (видимая на-глаз через кварцевую

трубку), в которой в основном заканчивались реакции, имела высоту не более 3 *см*. При увеличении процентного содержания кислорода в дутье или при увеличении скорости газов, особенно в первом случае, высота зоны уменьшалась. Это объясняется авторами тем, что при увеличении количества O_2, соприкасающегося в единицу времени с единицей поверхности, и при повышении температуры процесс образования CO активируется и может быть закончен на очень небольшом расстоянии без заметного повышения температуры последующих слоев. Примерные температуры, наблюдавшиеся по высоте слоя угля при скорости дутья в 0,2 *м/сек* и 30%-ном содержании в газе O_2, следующие: зона горения — 1200°, 3 *см* от зоны — 1000°, 7 *см* — 700° и 19*см*—450°. Возможность подобного «теплового сжатия» реакционной зоны подтверждается теорией Коревара, считающего его возможным при применении угля большей активности и пористости, малых размеров и малой зольности.

Исследования показали, что в зоне, лежащей за зоной горения, реакции вследствие полной газификации (получение только CO) идут лишь в случае малых скоростей газов. Так для древесного угля при скорости дутья в 0,067 *м/сек* содержание CO растет на расстоянии в 4 *см* от зоны горения с 16 до 20% и на расстоянии еще в 20 *см* доходит до максимальной величины в 23%; при скорости в 0,2 *м/сек* содержание CO растет на расстоянии от зоны горения в 3 *см* с 24 до 29%, оставаясь в дальнейшем постоянным; при скорости в 0,47 *м/сек* содержание CO растет на расстоянии от зоны горения в 2 *см* с 28 до 30%, оставаясь в дальнейшем постоянным. Таков же ход изменения состава газа и при коксе, но происходит он менее резко: так при скорости в 0,3 *м/сек* разность содержаний CO в газах, выходящих из слоя и зоны горения, составляет 7%, при 0,5 *м/сек* — 6%, при 0,8 *м/сек*— 5% и при 1 *м/сек* — 4,5%.

Основными факторами, регулирующими процесс газификации, согласно выводам исследователей, являются дисперсность и активность поверхности углерода, скорость дутья и концентрация O_2.

При малых скоростях газов интенсивность газификации мала и газификация не полна. С увеличением скорости газов интенсивность газификации и полнота ее растут, не ограничиваясь условиями времени, контакта и температуры зоны восстановления, что должно происходить до какого-то, авторами не достигнутого, предела, ограниченного скоростью взаимодействия углерода с кислородом. Максимальные скорости, при которых производились опыты, составляли для активированного угля 1,23 *м/сек* и для кокса — 1,07 *м/сек* (продолжительность контакта — 0,001 сек.).

При активированном угле увеличение содержания в дутье кислорода при малых скоростях дает в некотором интервале увеличения (с 20 до 25%) резкий рост интенсивности процесса, в дальнейшем рост замедляется и даже почти прекращается (выше 50% O_2) вследствие полной газификации (получение только CO). При средних скоростях (больше 0,25 *м/сек*) скорость процесса растет пропорционально увеличению количества кислорода, но количество газифицируемого углерода на единицу кислорода не изменяется.

По той же закономерности, но с количественной разницей протекает процесс при коксе. Менее активный, чем древесный уголь, он дает еще в начале средней области скоростей газификации (больше 0,25 *м/сек*) значительное содержание CO_2, падающее с ростом скорости. Максимум CO не достигается еще при 1,1 *м/сек* (4% CO_2 и 30% CO). Интенсивность процесса и процент использованного в CO кислорода значительно возрастает для кокса с увеличением содержания в дутье кислорода и в области средних скоростей. При возрастании содержания O_2 в дутье с 21 до 35% количество O_2, используемого для получения CO, возрастает на 20%, и при увеличении содержания O_2 с 35% до 56% оно возрастает еще на 8%.

Таким образом обогащение дутья кислородом имеет особенное значение для менее активных топлив.

Приведенные данные, как считают исследователи, свидетельствуют о меньшей необходимости создания условий для благоприятного протекания реакции $C + CO_2 = 2CO$ и о большей необходимости приближения к оптимальным кинетическим условиям, протекающих в генераторе реакций, при которых исключалась бы возможность реакции

$$CO + \frac{1}{2}O_2 = CO_2,$$

так как именно она регулирует процесс.

Для этй цели скорость дутья относительно частиц должна быть настолько велика, чтобы нагретые до высокой температуры CO и O_2 присутствовали совместно в течение промежутка времени, недостаточного для их взаимодействия.

Для интенсификации процесса газификации авторы рекомендуют ряд мероприятий:

1) применение больших скоростей дутья, превышающих 1,2 *м/сек* на свободное сечение, — 5 *м/сек* на слой (большая производительность);

2) применение мелких кусков топлива при невысоком слое (малое сопротивление и равномерность работы);

3) применение жидкого шлакоудаления и обогащенного кислородом (до 40—45%) дутья, как обеспечивающих значительную интенсификацию процесса при средних скоростях для низкосортного топлива.

Предположение авторов исследования о том, что при протекании процесса газификации в обычных условиях CO сгорает целиком в CO_2, восстанавливающуюся при наличии благоприятных условий в смысле температуры и продолжительности контакта газов и топлива, является необоснованным и спорным.

Ценность работы заключается в доказательстве возможности интенсификации процесса в условиях, подобных имеющим место в газогенераторах, и выявлении большой скорости первичного процесса окисления углерода и влияния на нее скорости газов и концентрации кислорода.

Серия работ по исследованию процесса взаимодействия углерода с кислородом была проведена Чухановым, Каржавиной, Хайкиной и др. (1932—1937).

Опыты с кусковым углем (2—5 *мм*) в кварцевой трубке с подачей дутья сверху и выгоранием всего угля (пробы газа характеризуют процесс в слое определенной для каждого момента, но вообще переменной высоты) при 1100—1400° указали на завершение процесса в первых 10—20 *мм* слоя при всех скоростях дутья.

При быстром охлаждении конечного газа во избежание догорания CO кривая CO_2 возрастает, почти не имея максимума и отстая от кривой CO, что свидетельствует о влиянии первичного получения CO по реакции (1) (см. выше — построение Чуханова).

Неизменность высоты реакционной зоны (10—15 *мм*) при содержании O_2 в 7—42%, скорости дутья 0—25 *м/сек* и размере частиц 0,5—3 *мм* позволяет предположить зависимость скорости расходования O_2 не только от диффузии, но и от химической реакции с углеродом. В пределах 1100—1600° и истинной скорости газа ($v_{ист}$) 0,2—35 *м/сек* окисление углерода через комплекс имеет одинаковый характер для аэровзвеси, индивидуальной частицы и слоя, и измеряемая константа скорости «реакции окисления» K_0 пропорциональна примерно $v_{ист}^{0,4}$, порядок близок к нулевому, изменяясь для малых концентраций O_2 до первого.

Для реакции «горения углерода» скорость процесса пропорциональна $O^{1,6}$ (O — концентрация O_2).

В зависимости от условий процесса возможно преобладание той или иной реакции.

Общее изменение концентрации O_2 суммирует изменения по обеим реакциям (1) и (2).

Если p — общее количество газов в *ммо/л*, то (с учетом разбавления газов получающейся CO) dO определяется из уравнения:

$$-\frac{dO}{dt} = K_0 + K_2 O^{1,6} + \frac{1}{3p} OK_0 + \frac{1}{p} K_2 O^{2,6},$$

где K_2 — измеряемая константа скорости реакции.

Зависимость dO от высоты реакционного слоя l ($l = v_{ист} t$) при высоких скоростях дутья определяется из выражения:

$$l = v_{ист} \int -\frac{dO}{K_0 + K_2 O^{1,6} + \frac{1}{3p} K_0 O + \frac{1}{p} K_2 O^{2,6}}.$$

Полученные расчетом кривые в широких пределах изменения T и O (4—40% O_2) соответствуют эксперименту.

По Чуханову, при газификации в слое при малых скоростях реакция (1) имеет меньшее значение, чем при больших. В высокоскоростном генераторе в силу предотвращения сгорания CO в CO_2 (тормозящего действия пламени), а также с повышением концентрации O_2 решающее значение имеет реакция «горения углерода».

Чем больше размер кислородной зоны, тем больше минимальная скорость, при которой достигается процесс высокоскоростной газификации.

Взгляды цитированных авторов в части некоторых положений находят подтверждение в ряде упомянутых выше исследований механизма процесса, устанавливающих первичное получение наряду с CO_2 также и CO (Рид и Уиллер, Майер, М. Майерс, Хивонен, Тью, Девис и Хоттел, Блинов и др.), и влияние массовой скорости кислорода на интенсивность газификации. Несмотря на некоторую неполноту построения механизма процесса, в частности на недоучет влияния диффузии в процессе восстановления CO_2 (для характеристики малой скорости восстановления CO_2 использованы данные Клемента, Адамса и Хескинса, ограниченные условиями опыта) и недостаточную оценку скорости реакции $2CO+O_2=2CO_2$, результаты исследований в части возможности весьма значительной интенсификации процесса очевидно являются подтвержденными. Следовательно они способствуют подведению теоретической базы под имеющиеся практические данные о высокой производительности газогенераторов и намечению дальнейших путей интенсификации процесса (высокоскоростная газификация).

Однако рассмотрение различных исследований не может ограничиваться примерами, подтверждающими одну точку зрения. Необходимо рассмотреть и объяснить примеры, подтверждающие начальное образование CO_2 и необходимость достаточной высоты температуры и продолжительности обтекания углерода для восстановления CO_2.

Для подтверждения правильности этой точки зрения приводятся указания на улучшение качества газа при уменьшении производительности генератора и повышении высоты слоя топлива.

Примером ухудшения (спорного — см. ниже) качества газа при увеличении интенсивности процесса может служить состав продуктов воздушного дутья при производстве водяного газа. Для повышения температуры слоя топлива в генератор водяного газа периодически с большой интенсивностью подают воздух, сжигающий углерод главным образом в CO_2 и в меньшей степени — в CO. Замечено (в некоторых опытах), что увеличение интенсивности дутья способствует повышению содержания в газах CO_2, что в этом случае желательно.

В табл. 16 приведены результаты опытов, проведенных Оргхимом по продуванию воздухом кокса с различной интенсивностью. Эти опыты указывают на резкое снижение содержания в газе CO и увеличение содержания CO_2 при увеличении интенсивности дутья.

Таблица 16

Зависимость состава воздушного газа от интенсивности дутья

№ п.п.	Давление дутья (в *мм* вод. ст.)	Колич. воздуха (в $м^3$/час)	Состав газа (в объемных процентах)								Темпер. в конце дутья (в °С)
			H_2S	CO_2	O_2	CO	H_2	CH_4	N_2	$\frac{CO}{CO_2}$	
1	100	602	1,2	7,0	0,4	20,6	6,0	0,6	64,2	2,95	—
2	200	880	1,0	11,0	0,6	12,2	3,6	0,6	71,0	1,11	850
3	300	1115	1,8	12,0	0,2	11,6	1,6	1,2	71,6	0,97	890
4	400	1320	1,2	13,4	0,2	10,2	1,6	1,2	72,2	0,76	930
5	500	1495	1,2	13,0	0,2	9,8	2,4	0,6	72,8	0,67	970
6	600	1665	1,0	14,0	0,2	9,8	2,4	0,6	72,0	0,62	1000

Кажущееся несоответствие приведенных данных и результатов интенсивного дутья в генераторах с интенсивно перемешивающимся слоем (генераторы Винклера) и генераторах с жидким шлакоудалением легко может быть устранено, если учесть, что в генераторе только в том случае может получиться много CO_2, если температура в генераторе низка и кислород дутья неравномерно распределяется по сечению, т. е. проходит отдельными каналами, не реагируя с углеродом, а дожигая CO.

Неравномерное распределение дутья обусловливается неравномерностью сопротивления отдельных участков слоя.

Следует отметить, что, согласно опытам Штрахе и Ягода (190) при максимальных примененных ими скоростях воздушного дутья содержание CO_2 не увеличивалось (табл. 26).

Возможно также сослаться на генераторы с автоматическими шуровочными приспособлениями, допускающими повышение производительности в 2—3 раза за счет равномерной пронизываемости слоя топлива благодаря шуровке.

Что касается фактора высоты раскаленного слоя, то его следует расценивать как влияющий на восстановление CO_2, получившейся в результате недостаточно равномерного распределения дутья по сечению, или аккумулирование тепла в слое. Доказательством этого могут служить уже упомянутые генераторы с автоматическими шуровочными приспособлениями, позволившие при увеличении производительности в 2—3 раза во столько же раз снизить требуемую высоту слоя. Что касается влияния слоя в смысле аккумулирования тепла, то оно обычно благоприятно для процесса газификации, особенно в случае генераторов водяного газа.

В табл. 17 приведены данные о скоростях и времени пребывания газов в слое раскаленного топлива. Эти данные, указывающие на возможность успешной газификации при большом диапазоне скоростей, опровергают предположение об особом химизме процесса при высокоскоростной газификации.

Эти данные свидетельствуют о сравнительно малой продолжительности контакта газов с углеродом и позволяют сделать вывод о получении в обычных условиях газификации в результате взаимодействия углерода с кислородом значительных количеств CO и о достаточной скорости реакции ее образования при высоких температурах как первичного продукта.

Небезынтересно отметить, что подсчеты, произведенные Ле-Шателье, а также Тренклером, показывают, что в случае сгорания углерода в CO за счет кислорода воздуха температура в генераторе должна была бы составлять с учетом потерь больше 1500°, а в случае сгорания в CO_2 — больше 2000° [1]. Так как при температурах выше

[1] Температуру зоны газификации определяют путем составления ее теплового баланса и учета тепла, выделенного в зоне по реакциям, внесенного нагретыми коксом и дутьем и потерянного с отводимыми из зоны газами и в окружающую среду.

Таблица 17

Скорость газов в слое топлива и продолжительность их контакта с топливом

Тип генератора	Топливо	Интенсивность газификации (в кг/м² час)	Высота раскаленной зоны (в м)	Скорость дутья (в сек.)		Продолжительность контакта (в сек.)	
				условная	действительная	условная	действительная
С вращающейся решеткой, без швельшахты	Древесина Торф	350	1,0	0,1	2,0	10	0,5
С вращающейся решеткой и швельшахтой	То же	350	2,0	0,1	2,0	20	1,0
С вращающейся решеткой	Каменный уголь	150	0,8	0,08	1,6	10	0,5
С вращающейся решеткой и автоматическим шуровочным приспособлением	То же	350	0,4	0,2	4,0	2	0,1
С жидким шлакоудалением	Кокс	700	2,5	0,54	10,9	4,6	0,2
Генератор Винклера . .	Подсушенный бурый уголь	1600	1,7	0,8	16,1	2,1	0,1

1500° плавится самая тугоплавкая зола, что в действительности в генераторе не имеет места, возможно заключить, что даже в случае сгорания углерода в CO_2 последняя тут же восстанавливается в CO, благодаря чему не происходит чрезмерного повышения температуры.

Расчеты к процессу получения воздушного газа

Независимо от хода реакций получения воздушного газа—с предварительным получением CO_2 и последующим ее восстановлением в CO или с непосредственным получением CO, — учитывая, что при газификации за счет воздуха в генераторном газе содержится N_2, процесс получения воздушного газа можно представить следующим образом.

При пропускании воздуха через слой раскаленного угля имеет место горение углерода в CO:

$$2C + O_2 + \frac{79}{21}N_2 = 2CO + \frac{79}{21}N_2 + 55\,514\ кал$$

и CO_2:

$$C + O_2 + \frac{79}{21}N_2 = CO_2 + \frac{79}{21}N_2 + 95\,407\ кал; \qquad (1)$$

восстановление CO_2 раскаленным углеродом в CO:

$$C + CO_2 + \frac{79}{21}N_2 = 2CO + \frac{79}{21}N_2 - 39\,893\ кал \qquad (2)$$

и прохождение N_2 воздуха в неизмененном виде, что в конечном итоге может быть представлено следующей реакцией:

$$2C + O_2 + \frac{79}{21}N_2 = 2CO + \frac{79}{21}N_2 + 55\,514\ кал. \qquad (3)$$

К получаемым газам примешивается некоторое количество CO_2, не разложившейся или образующейся в результате сгорания углерода или CO.

Присутствие N_2 понижает концентрацию CO_2 и CO, что влечет за собой смещение равновесия в сторону образования CO. При повышении давления содержание CO в равновесной смеси уменьшается, а при понижении — увеличивается.

Процессы, протекающие в зоне газификации при получении воздушного газа, в конечном итоге идут с выделением тепла. Выделяющееся тепло затрачивается на покрытие потери от охлаждения генератора, на подогрев топлива и процессы перегонки и подсушки топлива, почему и температуры в генераторе по направлению снизу вверх постепенно падают.

В процессах газификации, имеющих место на практике, равновесие системы $C + CO_2 = 2CO$ не успевает установиться, и газ в зоне газификации содержит больше CO_2, чем это должно было бы быть согласно условиям равновесия при высокой температуре зоны, а при выходе из генератора — меньше, чем это соответствует низкой температуре выхода газа.

Получающийся по реакции (3) газ имеет следующий состав:

$$CO = \frac{2 \cdot 100}{2 + \frac{79}{21}} = 34{,}7\% \text{ и } N_2 = \frac{\frac{79}{21} \cdot 100}{2 + \frac{79}{21}} = 65{,}3\%.$$

Теплотворная способность этого газа 1048 *кал/м³*.

Состав получаемых на практике газов отличается от вышеприведенного теоретического ($CO = 34{,}7\%$ и $N_2 = 65{,}3\%$) вследствие наличия в газах продуктов сухой перегонки и неразложившейся CO_2.

Пренебрегая влиянием продуктов сухой перегонки, можем принять следущие рассуждения [62].

Если бы углерод сгорел в CO_2, то содержание CO_2 в газах составляло бы 21% и N_2 — 79% (по объему).

Содержание CO в газе, получающемся при газификации углерода, можно подсчитать, если дано содержание в нем CO_2. При расчете на 100 частей воздуха, участвующего в газификации, и содержании в газе $a\%$ CO_2 получаем (в объемных соотношениях):

21 часть CO_2 соответствует 100 частям воздуха;

1 » CO_2 » $\frac{100}{21}$ » »

a » CO_2 » $\frac{100}{21}a$

На образование CO расходуется воздуха:

$$100 - \frac{100}{21} a \text{ частей.}$$

Каждые 100 частей воздуха вносят 21 часть O_2 и могут образовать 42 части CO и 121 часть продуктов газификации.

Следовательно в случае наличия в газе $a\%$ CO_2 и расхода $100 - \frac{100}{21} a$ частей воздуха на образование CO, получим содержание CO, равное (в процентах):

$$CO = \left(100 - \frac{100}{21} a\right) \frac{42}{121} = 2 \frac{100}{121} (21 - a) = 34{,}7 - 1{,}65\, a.$$

В 1 $м^3$ CO_2 или CO содержится 0,536 $кг$ C.

Содержание C в 1 $м^3$ генераторного газа составит в таком случае:

$$0{,}536\,(CO_2 + CO) = 0{,}536 \left(\frac{a}{100} + 2 \frac{21 - a}{121}\right) = 0{,}536 \frac{34{,}7 - 0{,}65\, a}{100}.$$

Если известно количество введенного воздуха L $м^3$ и содержание в газе CO_2 a %, то выход газа на L $м^3$ воздуха может быть определен с помощью следующего расчета.

На образование a частей CO_2 пошло $\frac{100a}{21}$ частей воздуха и на образование $2 \frac{100}{121} (21 - a)$ частей CO пошло:

$$\frac{2 \cdot 100 \cdot 100}{121 \cdot 2 \cdot 21} (21 - a) = \frac{10\,000}{121} \left(1 - \frac{a}{21}\right) \text{ частей воздуха,}$$

а всего на 100 частей газа расходуется воздуха:

$$\frac{100\, a}{21} + \frac{10\,000}{121} \left(1 - \frac{a}{21}\right) = \frac{100}{121} (a + 100) = 0{,}827\,(a + 100) \text{ частей.}$$

Выход газа на L $м^3$ воздуха составляет:

$$\frac{100\, L}{\frac{100}{121}(a + 100)} = \frac{121\, L}{a + 100} = \frac{100\, L}{0{,}827\,(a + 100)}\ м^3.$$

Если воспользоваться приведенным выше значением для содержания углерода в 1 $м^3$ газа, то получим количество прогазифицированного углерода (C $кг$ на L $м^3$ воздуха) равным:

$$C = L \frac{124}{a + 100} \left(\frac{a}{100} + 2 \frac{21 - a}{121}\right) 0{,}536 =$$

$$= L \frac{1{,}21\, a + 2\,(21 - a)}{a + 100} \cdot 0{,}536 = L \frac{18{,}6 - 0{,}348 a}{0{,}827\,(a + 100)}.$$

При $CO_2 = O$ имеем:

$$C = \frac{L \cdot 2 \cdot 21}{100} 0{,}536 = L \cdot 0{,}2250,$$

т. е. 1 $м^3$ воздуха газифицирует в CO 0,2250 $кг$ углерода.

В случае полного сгорания C в CO_2

$$a = 21$$

и

$$C = L \frac{1{,}21 \cdot 21}{121} \cdot 0{,}536 = L \cdot 0{,}1126,$$

т. е. за счет 1 $м^3$ воздуха сгорает в CO_2 0,1126 $кг$ C.

В теоретическом случае получения воздушного газа, состоящего из CO и N_2, выход газа на 1 $кг$ углерода равен:

$$\frac{1 \cdot 100}{0{,}536 \cdot 34{,}7} = 5{,}38\ м^3.$$

Теплотворная способность получаемого газа составляет:

$$\frac{1048 \cdot 5{,}38 \cdot 12 \cdot 100}{95\,407} = 71\%$$

от теплотворной способности углерода, что является следовательно предельным для воздушного газа.

Соображения о ведении процесса получения воздушного газа

В соответствии с данными, характеризующими механизм реакции, и исследованиями процесса газификации последовательность процесса можно рассматривать следующим образом. В нижней части зоны газификации углерод сгорает одновременно в CO и CO_2; при этом часть CO, взаимодействуя со свободным кислородом, сгорает в CO_2, а часть CO_2 восстанавливается в CO; в верхней части зоны газификации имеющаяся в газе обычно в незначительном количестве CO_2 восстанавливается в CO. Чем выше температура зоны газификации, чем лучше обтекание газами кусков топлива, чем равномернее распределение газов по сечению, тем меньший требуется слой для получения газа, содержащего много CO и мало — CO_2, и восстановления имеющейся в газе CO_2.

При низкой температуре зоны газификации, неравномерном распределении газов по сечению и плохом обтекании газами топлива получаемый газ содержит значительное количество CO_2 и имеет высокую температуру. В последнем случае иногда приходится выправлять режим, или увеличивая высоту слоя топлива (увеличение продолжительности контакта CO_2, с топливом) или снижая производительность генераторов (увеличение продолжительности контакта с топливом).

Слой топлива, находящийся над зоной газификации, служит теплообменником — поток газов отдает ему свое тепло. Чем влаж-

нее и крупнее топливо, тем большая высота требуется для достаточной отдачи тепла от газов к топливу.

Таким образом для получения газа с высокой теплотворной способностью требуются достаточно высокая температура зоны газификации, равномерность распределения газов по сечению и хорошее обтекание топлива газами, и в случае работы с недостаточно высокими температурами или неудовлетворительным распределением газов требуется наличие высокого раскаленного слоя, обеспечивающего восстановление получаемой CO_2.

4. ПОЛУЧЕНИЕ ВОДЯНОГО ГАЗА

Если в генератор подается водяной пар, то кислород его окисляет углерод в CO и CO_2, причем к этим газам прибавляется водород, освобождаемый из водяного пара.

Разложение водяного пара возможно по реакциям:

$$C + H_2O = CO + H_2 - 30\,044\ кал. \quad (4)$$

$$C + 2H_2O = CO_2 + 2H_2 - 20\,195\ кал. \quad (5)$$

Образующиеся по указанным реакциям CO и H_2 могут взаимодействовать по реакции:

$$CO + H_2O = CO_2 + H_2 + 9849\ кал. \quad (6)$$

Получившаяся по реакциям (5) и (6) CO_2 реагирует с углеродом по реакции $C + CO_2 = 2CO$.

Из указанных четырех реакций только две являются не зависящими друг от друга; каждые две могут быть выражены двумя другими; при установлении равновесий двух из них устанавливается равновесие и остальных.

При наличии свободного кислорода могут также протекать реакции:

$$2H_2 + O_2 = 2H_2O + 115\,602\ кал. \quad (7)$$

$$2CO + O_2 = 2CO_2 + 135\,300\ кал.$$

Константа равновесия реакции (4):

$$K_{P_{CO}} = \frac{P_{CO} P_{H_2}}{P_{H_2O}},$$

реакции (5):

$$K_{P_{CO_2}} = \frac{P_{CO_2} P_{H_2}^2}{P_{H_2O}^2}$$

и реакции (6) (реакции водяного газа):

$$K_{P_2} = \frac{P_{CO}\ P_{H_2O}}{P_{CO_2}\ P_{H_2}}. \quad (б)$$

Если по предыдущему константа равновесия реакции (B):

$$K_{P_1} = \frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2}}, \quad (а)$$

то

$$\frac{K_{P_1}}{K_{P_2}} = \frac{P_{CO} P_{H_2}}{P_{H_2O}} = K_{P_{CO}} \text{ и } \frac{K_{P_1}}{(K_{P_2})^2} = \frac{P_{CO_2} P_{H_2}^2}{P_{H_2O}^2} = K_{P_{CO_2}}.$$

Таким образом реакции (4) и (5) протекают не самостоятельно, а связаны соотношениями (а) и (б), охватывающими все основные процессы газификации, протекающие в реакционной зоне генератора.

Значения свободных энергий реакций взаимодействия углерода и водяного пара и получаемых продуктов в зависимости от температуры приведены на рис. 1.

В зоне газификации происходит также образование некоторых количеств CH_4. Однако при газификации при атмосферном давлении содержание CH_4 в равновесной смеси газов не велико, составляя при температуре выше 900° менее 1%. Гораздо большее значение имеет образование CH_4 при высоких давлениях и в области более низких температур. Соображения об условиях образования CH_4 приведены на стр. 58 и 183.

При получении водяного газа имеют место окисление C в CO и CO_2, идущее с выделением тепла, и разложение H_2O и CO_2. На разложение водяного пара затрачивается больше тепла, чем выделяется при окислении углерода, и получение водяного газа идет в конечном итоге с поглощением тепла.

Водяной газ обладает большей теплотворной способностью, чем воздушный, так как в его состав не входит азот, переходящий из воздуха при получении воздушного газа.

Реакции получения водяного газа протекают с поглощением тепла, и для возможности непрерывного их протекания требуется какой-то посторонний источник тепла. На практике для получения водяного газа сначала через слой топлива продувают воздух и, после того как температура слоя в результате сгорания углерода в CO и CO_2 поднимется, пропускают через него пар, получая водяной газ, состоящий из CO, H_2O, CO_2 и H_2 (практически и из небольших количеств N_2 и CH_4). В результате поглощения тепла при процессе температура слоя топлива понижается, и после того, как температурные условия становятся неблагоприятными для ведения процесса, вновь производят воздушное дутье.

Непрерывный процесс возможен лишь при высоком перегреве пара и одновременном дополнительном подводе тепла к камере газификации, так как в случае подвода тепла за счет одного лишь теплосодержания пара потребовался бы перегрев его до недостижимо высокой температуры.

Реакция $C + H_2O = CO + H_2 - 30\,044$ кал.

Значение константы равновесия реакции (4) в зависимости от температуры приведено в табл. 7 и на рис. 19.

Кривая на рис. 19 дает значения $K_{P_{CO}}$ для интервала температур от 650 до 1500°.

Реакция мономолекулярна. Она протекает ниже 900° медленно и сравнительно быстро — выше 900°.

Если константу скорости этой реакции принять за единицу, то скорость реакции $C+CO_2=2CO$ будет равна 2,18.

Реакция $C + 2H_2O = CO_2 + 2H_2 - 20\,195$ кал.

Обратимая реакция (5) может протекать одновременно с реакцией (4). Значение константы равновесия этой реакции приведено в табл. 7. Реакция мономолекулярна, несмотря на участие в ней 2 мол. воды, что объясняется различно, например последовательным протеканием реакций (4) и (6).

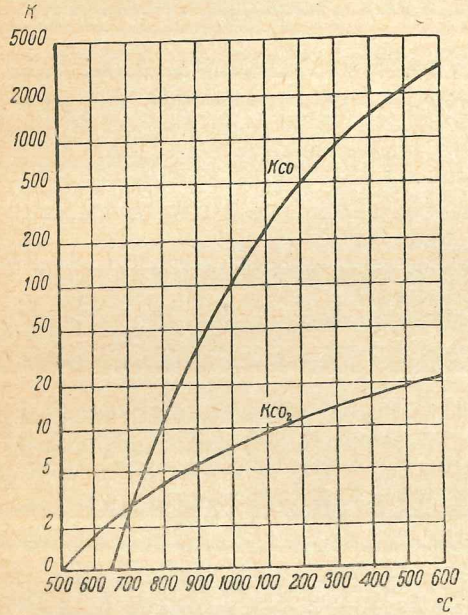


Рис. 19. Зависимость констант равновесия реакций (4) и (5) от температуры по Люису и Рэндлу:

$$K_{CO} = \frac{P_{CO} \cdot P_{H_2}}{P_{H_2O}};$$

$$K_{CO_2} = \frac{P_{CO_2}^{\frac{1}{2}} \cdot P_{H_2}}{P_{H_2O}}$$

По данным Хаслама и Русселя, эта реакция при температурах 400—900° протекает не быстро, но значительно быстрее, чем реакция (4), и при температурах выше 900° скорость реакций одинакова.

Реакция всегда сопровождается реакциями (4) и (B), а по некоторым данным (см. ниже) эта реакция не протекает совсем, а протекают последовательно реакции (4) и (6).

Реакция $CO + H_2O = CO_2 + H_2 + 9899$ кал.

Если из уравнения (5) вычесть почленно уравнение (4), то получим уравнение (6), связывающее реакции водяного газа:

$$CO + H_2O = CO_2 + H_2 + 9849 \text{ кал.} \qquad (6)$$

При протекании реакции справа налево тепло поглощается, а слева направо — тепло выделяется.

Константа равновесия этой реакции

$$K_{P_2} = \frac{P_{CO} \cdot P_{H_2O}}{P_{CO_2} \cdot P_{H_2}} \qquad (б)$$

характеризует ее и реакции получения водяного газа.

На установление равновесия реакции (6), нвзываемой реакцией водяного газа, давление не оказывает влияния; вообще же установление равновесия водяного газа зависит от давления (см. ниже).

Условия равновесия этой реакции впервые изучал Горстма[illegible]. Исследования, проведенные впоследствии Ганом (63) над газами в квар[illegible]

цевой трубке с платиновым катализатором, дали значения K_{P_2}, приведенные в табл. 18.

Таблица 18

Значения $K_{P_2} = \frac{P_{CO} \cdot P_{H_2O}}{P_{CO_2} P_{H_2}}$ в зависимости от температуры (по Гану)

Температура (в °С) . .	685	830	986	1250	1500	1600
Значение K_{P_2}	0,52	1,0	1,6	2,6	3,87	4,24

Из этих данных следует, что до 830° ($K_{P_2} \leqslant 1$) CO является более сильным восстановителем, и при температурах выше 830° H_2 восстанавливает сильнее, чем CO.

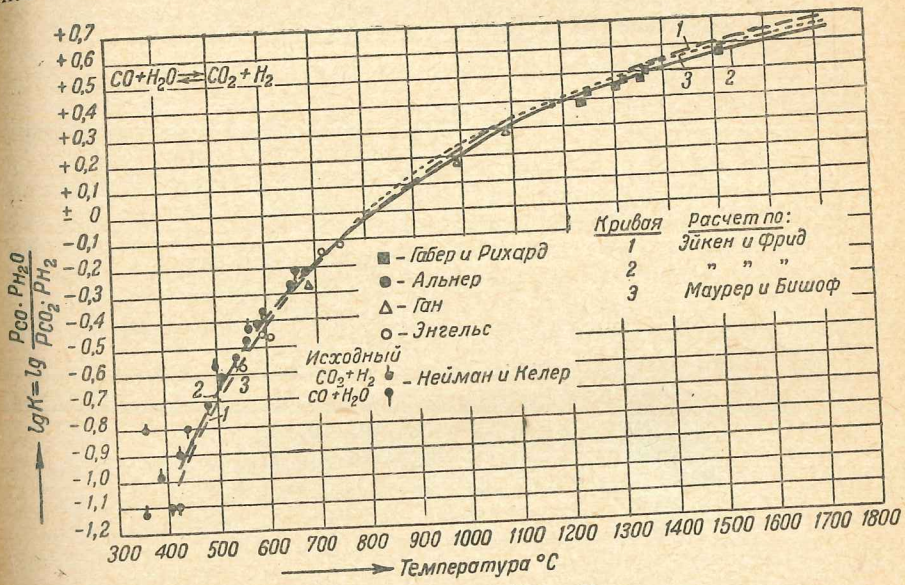


Рис. 20. Зависимость $\lg K_{P_2} = \lg \frac{P_{CO} \cdot P_{H_2O}}{P_{CO_2} \cdot P_{H_2}}$ от температуры

Брианом (64) были вычислены величины K_{P_2} по данным различных исследователей. Наиболее надежными автор считает величины, полученные по данным Эйкена и Истмана. Из приведенных в табл. 19 констант к последним приближаются константы Неймана и Келлера. Помимо указанных пользуются также данными Маурера и Бишофа и Бриганта (см. также рис. 20).

С повышением температуры увеличивается количество CO в равновесной смеси. Избыток пара препятствует образованию CO.

При температурах выше 1500° эта реакция протекает мгновенно, ниже 900° — медленно. В интервале 900—1500° установившееся

Таблица 19

Сравнение значений констант $K_{P_2}=\frac{P_{CO}\cdot P_{H_2O}}{P_{CO_2}\cdot P_{H_2}}$ по данным различных исследователей

Абсолютная температура	Исследователи				
	Габер	Нейман и Келлер	Люис и Рэндл	Эйкен	Истман
500	$5{,}75\cdot10^{-3}$	$7{,}91\cdot10^{-3}$	$7{,}23\cdot10^{-3}$	$8{,}00\cdot10^{-3}$	$7{,}34\cdot10^{-3}$
600	$2{,}91\cdot10^{-2}$	$3{,}77\cdot10^{-2}$	$3{,}53\cdot10^{-2}$	$3{,}81\cdot10^{-2}$	$3{,}56\cdot10^{-2}$
700	$8{,}96\cdot10^{-2}$	$1{,}12\cdot10^{-1}$	$1{,}07\cdot10^{-1}$	$1{,}12\cdot10^{-1}$	$1{,}07\cdot10^{-1}$
800	$2{,}02\cdot10^{-1}$	$2{,}49\cdot10^{-1}$	$2{,}40\cdot10^{-1}$	$2{,}49\cdot10^{-1}$	$2{,}39\cdot10^{-1}$
900	$3{,}68\cdot10^{-1}$	$4{,}50\cdot10^{-1}$	$4{,}42\cdot10^{-1}$	$4{,}50\cdot10^{-1}$	$4{,}38\cdot10^{-1}$
1000	$6{,}76\cdot10^{-1}$	$7{,}25\cdot10^{-1}$	$7{,}09\cdot10^{-1}$	$7{,}14\cdot10^{-1}$	$7{,}02\cdot10^{-1}$
1400	2,12	2,23	2,16	2,17	2,18
1800	3,69	3,65	3,70	3,63	3,81

равновесие с изменением температуры изменяется не интенсивно. Присутствие катализаторов, каковыми могут быть окислы железа и поверхность топлива, значительно повышают скорость этой реакции, что имеет большое значение для процесса газификации.

По А. Науману и Ц. Пистору [65] CO_2 не восстанавливается H_2 в CO при температурах ниже 900°. Взаимодействие между CO и водяным паром до 560° не наблюдалось, при 600° восстановилось 2%, около 900° — 8% и около 954° — 10% CO в CO_2. Это свидетельствует о вялом протекании реакции водяного газа до 900°.

Ввиду малой скорости реакции (6) до 900° ее обычно проводят в присутствии катализаторов (в производстве синтетического аммиака и других производствах, потребляющих водород).

Эвансом и Ньютоном (1926) [66] было установлено, что лучшими однокомпонентными низкотемпературными катализаторами являются окиси железа и кобальта. Добавка активаторов повышает активность катализаторов; наилучшие результаты дает совместное действие двух активаторов: алюминия и калия.

Уайт и Шульц (1934) [67] нашли, что применение в качестве катализатора сплавленной окиси кобальта ускоряет реакцию $CO+H_2O=CO_2+H_2$. Опыты показали, что равновесие устанавливается при 310° и скорости в 2400 объемов водяного газа на 1 объем катализатора в час.

Реакция $2H_2 + O_2 = 2H_2O + 115\,602$ кал.

Уравнение для вычисления значения константы равновесия реакции (7) приведено в табл. 7. В равновесных смесях при температурах ниже 1650° H_2 и O_2 присутствуют в очень небольших количествах. Пары воды заметно диссоциируют лишь при очень высоких температурах. При 1750° расщепляется только 0,37% водяного пара.

Реакция $2H_2+O_2=2H_2O$ при наличии свободных O_2 и H_2 протекает очень быстро. Горение H_2 происходит в 2,86 раза быстрее горения CO. Скорость горения H_2 при низких температурах значительно увеличивается в присутствии горячих твердых поверхностей.

Боне и соавторы (1915) показали, что реакция (7) катализируется поверхностями при любой температуре и что при высоких температурах всякая поверхность является одинаково хорошим катализатором. Они также нашли, что скорость горения H_2 пропорциональна парциальному давлению H_2, а не квадрату концентрации, как должно было бы быть, если бы реакция была тримолекулярной. Они пришли к выводу, что H_2 сначала образует H_2O_2, разлагающуюся на H_2O и кислород, либо что скорость горения пропорциональна скорости диффузии H_2 через неподвижную пленку у катализатора. Боне и Ховард (1921) [69] нашли, что при взрыве смеси H_2 и O_2 реакция является тримолекулярной. По опытам Риделя (1919) [34], пропускавшего смесь H_2 и CO над катализаторами из CuO, при 100—400° реакция является бимолекулярной.

По опытам Фалька (1907) [33] при одновременном сгорании CO и H_2 обе реакции тримолекулярны, при отдельном же сгорании H_2 реакция бимолекулярна.

Исследования взаимодействия углерода и водяного пара

При воздействии водяного пара на раскаленный углерод протекают первичные и вторичные реакции. Механизм и скорость процесса зависят от многочисленных факторов: температуры, продолжительности контакта, скорости и состава газов, характера и величины поверхности топлива и присутствия катализаторов.

Вследствие недостаточной полноты и противоречивых экспериментальных данных, обусловленных сложностью исследования, трудно дать обобщающую теорию протекания процесса, и поэтому в части механизма процесса имеется несколько построений.

Ниже приводятся данные о наиболее важных исследованиях.

Лангло (1857) [70] исследовал воздействие водяного пара на раскаленный кальцинированный древесный уголь, находящийся в фарфоровой трубке, и нашел, что повышение температуры способствует увеличению содержания CO и уменьшению содержания CO_2.

Отсюда он сделал вывод, что первичным продуктом взаимодействия углерода с H_2O наряду с H_2 является также CO_2, восстанавливающаяся в CO.

Лангло не придавал значения количеству вводимого водяного пара, что является недочетом его опытов.

Лонг (1878) [71] исследовал воздействие водяного пара на раскаленный древесный уголь, нагреваемый в фарфоровой трубке до красного каления. Он наблюдал уменьшение образования CO и увеличение образования CO_2 по мере окисления угля и принял следующую последовательность протекания реакции: $C+2H_2O=CO_2+2H_2$; $C+CO_2=2CO$ и $CO+H_2O=CO_2+H_2$.

Как отмечает Дольх [4], возможно, что увеличение количества CO_2 вызывалось не первичным ее образованием, а уменьшением при исследовании количества топлива и увеличением избытка водяного пара. Результаты опытов могут быть объяснены также следующей

последовательностью протекания реакций (предложена Ферфером): сначала идет реакция $C+H_2O=CO+H_2$ и затем $CO+H_2O=CO_2+H_2$.

Науман и Пистор (1885) [65] исследовали взаимодействие CO и H_2O. В присутствии 80-сантиметрового слоя из кусочков пемзы в стеклянной трубке начало взаимодействия наблюдалось около 600°. В фарфоровой незаполненной трубке диаметром в 8 *мм* при 861—954° наблюдалось появление значительных количеств CO_2 (до 10,5%). Обратная реакция CO_2+H_2 протекала при температуре выше 900°.

Лангом (1888) [73] при воздействии смеси водяного пара и CO_2 (как разбавителя) было найдено, что водяной пар взаимодействует с газовым углем при температуре ниже 600° по реакции $C+2H_2O=CO_2+2H_2$, так как в получаемом газе нет CO. Ничтожное образование CO (0,9%) дал также опыт, проведенный при 630° со смесью водяного пара и азота при малой скорости потока.

Для выявления влияния избыточного водяного пара на ход реакции при 814—1054° Ланг выбрал мало активный кристаллический очищенный доменный графит. При опыте выявилось, что с повышением температуры количество CO возрастало.

Ланг принимает, что при повышении температуры протекают реакции $C+CO_2=2CO$ и $CO+H_2O=CO_2+H_2$.

Ввиду большого количества H_2O сравнительно с графитом условия для окисления CO были очень благоприятны. При меньшем количестве водяного пара значение реакции $CO+H_2O=CO_2+H_2$ сравнительно с образованием CO в результате разложения CO_2 должно снизиться. Ланг считает, что наличие большого количества CO_2 при высокой температуре может иметь место лишь при прохождении продуктами реакции в смеси с избыточным паром не заполненных углеродом участков. При наличии же достаточного количества раскаленного и имеющего большую поверхность углерода содержание CO_2 и H_2O в газе падает до предела, определяемого неполнотой протекания реакций:

$$C+CO_2=2CO \text{ и } C+2H_2O=CO_2+2H_2.$$

По Лангу первичной является реакция $C+2H_2O=CO_2+2H_2$, после чего следует реакция $C+CO_2=2CO$, и в свободном пространстве протекает реакция

$$CO+H_2O=CO_2+H_2.$$

Выводы Ланга в значительной степени опорачиваются тем, что он не учитывал возможности протекания реакции $CO+H_2O=CO_2+H_2$ в присутствии углерода.

Ничто также не препятствует принять на основании опытов Ланга, что вначале получалась CO, которая затем окислялась водяным паром в CO_2.

По опытам Гарриса (1894) [74], изучавшего взаимодействие водяного пара с древесным углем при низких температурах (600—700°), разложение водяного пара шло главным образом по реакции $C+2H_2O=CO_2+2H_2$, и получалось только 5—10% CO. При повышении температуры содержание CO увеличивалось, разложение водяного пара все более приближалось к реакции $C+H_2O=CO+H_2$.

Опыты Гарриса в интервале температур 674—1125° указали на большое значение при взаимодействии углерода с водяным паром реакции $CO+H_2O=CO_2+H_2$ и на сравнительную близость полученных составов газов к равновесным (табл. 20). В этих опытах равновесие реакций газов с углеродом не установилось, и соотношение $\frac{CO}{CO_2}$ во всех случаях было значительно меньше равновесного.

Таблица 20

Значения K_{P_2} по опытам Гарриса

t (в °C)	674	758	838	861	954	1010	1060	1125
$K_{опыт}$	1,70	0,85	0,94	0,89	2,25	2,12	2,78	0,48
$K_{выч}$	0,49	0,70	0,98	1,07	1,41	1,65	1,88	2,11

Габер и Ричард (1904) [75] при исследовании пламени бунзеновской горелки наблюдали, что состав газов холодной части пламени соответствует равновесию при значительно более высокой температуре, и заключили, что сравнительно быстрое установление равновесия в газах, получающихся при воздействии водяного пара на уголь, связано с присутствием раскаленного угля.

Ряд исследований над воздействием водяного пара на древесный уголь и каменноугольный кокс в интервале температур 800—1300° при продолжительности соприкосновения газов и кокса в 0,9—1,1 сек. был произведен Клементом и Адамсом (1911) [76].

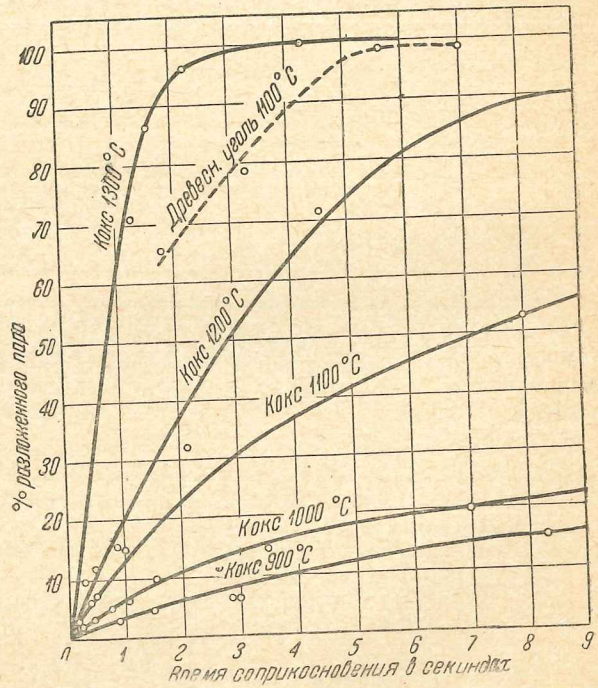


Рис. 21. Зависимость разложения водяного пара коксом и древесным углем от температуры и продолжительности соприкосновения

Влияние температуры на интенсивность разложения водяного пара каменноугольным коксом и древесным углем видно из кривых рис. 21 и 22, построенных на основании исследований Клемента и Адамса. С повышением температуры интенсивность разложения водяного пара растет,

причем древесный уголь оказывается значительно более активным топливом, чем каменноугольный кокс.

По исследованиям Клемента и Адамса, в интервале температур 900—1100° содержание CO_2 растет с увеличением продолжительности контакта и повышением температуры. При малой продолжительности соприкосновения — от 0,5 до 3 сек. (т. е. в пределах, приближающихся к условиям в газогенераторах) — количество CO_2 в сухой смеси увеличивается с температурой и продолжительностью контакта от 6 (при 900° и 0,5 сек. соприкосновения) до 14% (при 1100° и 3 сек.). С дальнейшим повышением температуры содержание CO_2 сначала увеличивается, а потом быстро уменьшается, составляя при 1200° и продолжительности соприкосновения в 1 сек. 5%, при продолжительности соприкосновения в 3 сек. — 1% и при 1300° и самом непродолжительном (0,5 сек.) контакте — почти нуль.

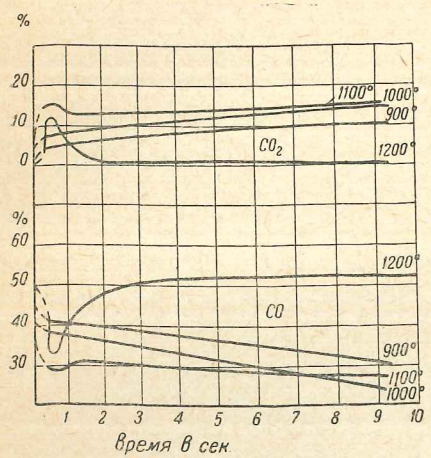


Рис. 22. Зависимость состава газа от температуры и продолжительности соприкосновения

При 1200° в начале реакции получается газ, не содержащий CO_2; содержание CO_2 затем быстро растет. Дальнейшее быстрое падение содержания CO_2 соответствует началу реакции $C + CO_2 = 2CO$.

Количество CO, образующейся при 900—1100 °, наоборот, уменьшается, падая для малой продолжительности контакта с 43% (900° и 0,5 сек.) до 30% (1100° и 0,5 сек.). С дальнейшим повышением температуры содержание CO быстро увеличивается до 50% и выше.

Количество образующегося H_2 в интервале 900—1100° растет с температурой и продолжительностью контакта, составляя для 900° и 0,5 сек. — 50% и для 1100° и 3 сек.—54%. Изменение содержания H_2 идет медленнее, чем CO_2 и CO. С дальнейшим повышением температуры содержание H_2 понижается.

При исследованиях Клемента и Адамса значения

$$K_{p\ опыт} = \frac{P_{CO} \cdot P_{H_2O}}{P_{CO_2} \cdot P_{H_2}}$$

почти во всех случаях намного превышали значения констант равновесия, вычисленные по уравнениям изохор.

Клемент и Адамс принимают, что первичными реакциями при взаимодействии углерода с паром являются следующие:

$$C + H_2O = CO + H_2 \text{ и } C + 2H_2O = CO_2 + 2H_2.$$

Полученные газы могут взаимодействовать между собой и с углеродом:

$$CO + H_2O = CO_2 + H_2.$$
$$C + CO_2 = 2CO.$$

Из опытов Клемента и Адамса делаются следующие выводы:

1. Скорости разложения водяного пара и образования CO зависят от природы топлива, и для древесного угля они больше, чем для кокса.

2. При газификации кокса разложение водяного пара при 1100° не заканчивается, даже при малой скорости пара. При продолжительности соприкосновения в 8 сек. больше 30% водяного пара остается неразложенным.

При температурах 900—1000° реакция (5) имеет большее значение чем реакция (4), протекающая с большей скоростью при температурах выше 1200°. При температуре выше 1100° разложение CO_2 протекает в большей степени, чем разложение H_2O, а при температурах ниже 1100° — наоборот.

Используя данные Клемента и Адамса, можно сделать и следующие выводы.

Превышение $K_{опыт}$ над $K_{выч}$ свидетельствует о возможности протекания реакции $CO + H_2O = CO_2 + H_2$, в данном случае только в направлении образования CO_2. Реакция же $C + CO_2 = 2CO$ может протекать только в сторону образования CO. Таким образом CO_2 может получиться только по реакциям:

$$CO + H_2O = CO_2 + H_2 \text{ и}$$
$$C + 2H_2O = CO_2 + 2H_2.$$

Ввиду медленности получения CO за счет образования и разложения CO_2 большое количество CO, содержащееся в газе, может получиться главным образом по реакции $C + H_2O = CO + H_2$, что подтверждается увеличением при 900—1100° содержания CO_2 с увеличением продолжительности контакта.

Как указывает Дольх, результаты опытов Клемента и Адамса вполне могут быть объяснены также следующей схемой протекания реакций:

$$C + H_2O = CO + H_2$$
$$CO + H_2O = CO_2 + H_2$$
$$C + CO_2 = 2CO.$$

Гвоздь (1918) [77] исследовал процессы газификации при низких температурах (560—838°) в зависимости от скорости пара и вида топлива. Уголь нагревался в тонкостенной кварцевой трубке. Количество и скорость пара были очень велики, и разложение его — мало (в большинстве случаев меньше 5%, а во многих случаях и меньше 1%).

Опыты велись с газовым коксом (золы — 8,5%), ламповым углем (золы — 0,1%), углем из сахара (золы — 0,3%), электродным углем

(золы — 0,2%), ретортным графитом (следы золы) и древесным углем (золы — 1,4%).

При воздействии на газовый кокс (775—855°) был получен газ с высоким, уменьшавшимся с температурой, содержанием CO_2, что объясняется Гвоздьем высокой реакционной способностью кокса (при 775°: CO_2 — 26,8%, CO — 8,6% и H_2 — 60,4%; при 838°: CO_2 — 10%, CO — 32,5% и H_2 — 49,2%).

Опыты, проведенные Гвоздьем с воздействием при разных температурах водяного пара на ламповый уголь, свидетельствуют о получении в интервале температур 560—830° газа с преимущественным содержанием CO и H_2 (при 560°: CO_2 — 8,6%, CO — 39,5%, H_2 — 40,0% и остаток — 11,9%; при 830°: CO_2 — 5,1%, CO — 41,6%, H_2 — 49,9% и остаток — 3,4%).

Примерно аналогичные результаты дали уголь из сахара, электродный и ретортный графит.

Опыты, проведенные с воздействием водяного пара на древесный уголь в интервале температур 560—790°, указывают на получение значительных количеств CO_2 (при 570°: CO_2 — 28,6%, CO — 4,3%, H_2 — 62,2% и остаток — 4,8%; при 790°: CO_2 — 17,3%, CO — 23,3%, H_2 — 54,2% и остаток — 5,2%).

На основании своих исследований Гвоздь делает вывод о протекании при взаимодействии водяного пара с углеродом первоначальной реакции $C + H_2O = CO + H_2$ и о каталитическом воздействии зольных элементов топлива на реакцию $CO + H_2O = CO_2 + H_2$.

Гвоздь считает, что в результате взаимодействия водяного пара с углеродом образуется CO, переходящая частично в CO_2 в отношении, соответствующем равновесному. По его мнению, это соответствует результатам опытов Фарупа при 821—911°, не обнаружившего в газе заметных количеств CO_2 и предположившего, что это соответствует малой равновесной концентрации CO_2 при данной температуре.

Хаслам, Гичкок и Рудэй (1923)[78] изучали взаимодействие перегретого водяного пара с коксом и электродным углем для дуговых ламп. Топливо находилось в фарфоровой трубке, высота слоя составляла 250 *мм*, размер частиц — 5—8 *мм*, давление было переменным, и продолжительность контакта составляла 0,113 и 0,226 сек.

На рис. 23 представлены данные исследования.

Исследователи нашли, что реакции (4), (5) и (B) являются первичными, одновременными и мономолекулярными по отношению к пару. Скорости реакций ниже 800° C очень малы, вблизи 1000°— велики и практически удваиваются при повышении температуры на 100°.

При температурах много ниже 900° реакция (4) практически не протекает, и при скорости реакции (5), равной единице, скорость реакции (B) равна 2. При температурах, значительно превышающих 900°, и скорости реакции (4) равной единице скорость реакции (B) равна 2,18.

Отношение $\frac{CO}{CO_2}$ при 900—1200° не зависит от характера угля,

(размер частиц, пористость и т. д.), давления и продолжительности контакта и мало зависит от температуры, а определяется главным образом количеством неразложенного пара. До содержания неразложенного пара в 60% величина $\frac{CO}{CO_2}$ остается постоянной, после чего быстро увеличивается с разложением водяного пара. Степень

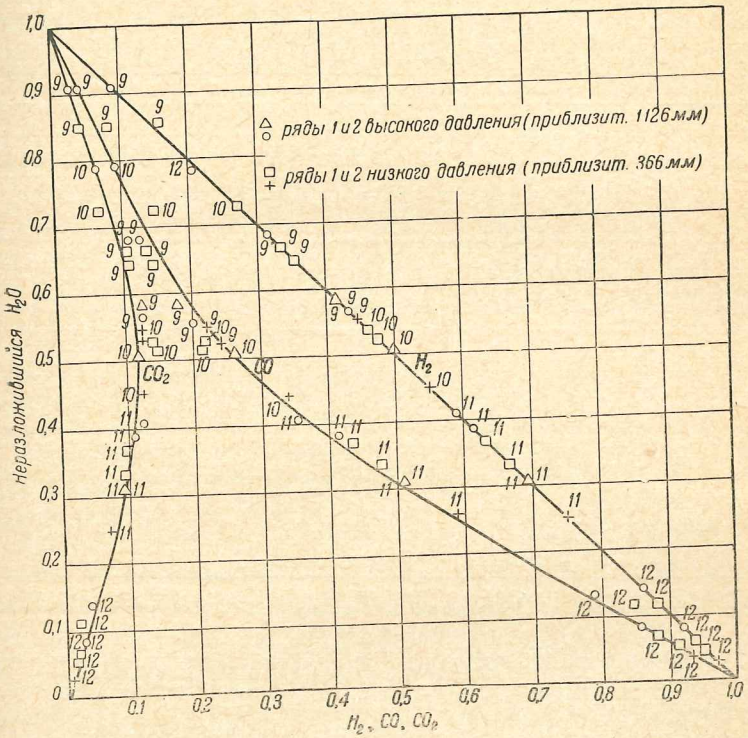


Рис. 23. Объем образующихся CO_2, CO и H_2 на единицу объема вводимого пара. Цифры на кривых — температура в сотнях °C

разложения пара в свою очередь зависит от времени соприкосновения, температуры и поверхности углерода.

Реакция (6) в газовой фазе не протекает, а протекает только в местах, где CO адсорбировано поверхностью углерода.

Возрастание давления (0,5—1,5 *ат*) практически не изменяет состава газа, но вызывает пропорциональное увеличение скорости образования газа, так же как величина реагирующей поверхности. Следовательно производительность генератора может быть увеличена путем повышения давления, при котором он работает.

Полученные данные представлены на рис. 23 в виде кривых CO_2, CO и H_2, получившихся при подаче определенного объема водяного пара и не зависящих от характера угля, давления пара, продолжительности контакта и почти не зависящих от температуры.

Прямая пропорциональность давления и скорости реакции свидетельствует о том, что если водяной пар принимает участие не в одной, а в нескольких реакциях, то порядок каждой из них должен быть одним и тем же относительно пара, так как в противном случае изменение давления неодинаково изменяло бы скорость реакций и точки не располагались бы на одной кривой; кроме того все эти реакции должны быть мономолекулярными относительно водяного пара, так как в противном случае влияние давления не могло бы быть обратно пропорционально времени.

Один и тот же начальный уклон кривых CO и CO_2 свидетельствует о первичном получении обоих газов и о мономолекулярном характере реакции $C + 2H_2O = CO_2 + 2H_2$.

Решение уравнений скоростей реакций дает для полученных данных выражение:

$$(\beta - \alpha) V = x - x^{\frac{\beta}{\alpha}},$$

где

$$\beta = \frac{K_1}{K_5},$$

$$\alpha = 2 + \left(\frac{K_4}{K_5}\right),$$

K_1, K_4 и K_5 — константы скорости реакций (1), (4) и (5),
x — количество неразложенного водяного пара в газе,
V — объем CO_2.

Для кривых рис. 23

$$\beta = 4{,}18 \text{ и } \alpha = 3{,}17, \text{ откуда}$$

$$1{,}01\, V = x - x^{1{,}319}.$$

Результаты опытов Хаслама и соавторов не совпадают с данными других исследователей.

Пекстон и Кобб (1923) [79] исследовали взаимодействие водяного пара со среднетемпературным (900°), высокотемпературным (1270°) и металлургическим коксом при различном парциальном давлении водяного пара, разбавлявшегося азотом. Опыты проводились в трубке диаметром в 25 *мм*; слой топлива имел высоту в 75 *мм*; размер частиц составлял 2,5—5 *мм*. Продолжительность контакта менялась в широких пределах. В зависимости от способа изготовления кокса из одного и того же угля менялись скорость взаимодействия с паром и продолжительность установления равновесия водяного пара. Скорость реакции металлургического кокса составила $^3/_2$ скорости реакции с коксом (1270°). При 1000° металлургического кокса было в час прогазифицировано в 4 раза больше, чем при 900°. Оказалось также, что парциальное давление пара не влияло при постоянном слое и постоянной температуре на степень разложения пара, т. е. эффективность разложения пара зависела только от скорости его подачи независимо от разбавления азотом.

Ряд исследований над воздействием водяного пара на различные топлива произвели Брендер-а-Брандис и Ле-Нобель (1927) [80].

Они вводили водяной пар при постоянном давлении в кварцевую реакционную трубку, подогревавшуюся в электрической печи. В части трубки с насадкой пар подогревался и далее попадал в слой кокса высотой в 10 *см*. Температура, при которой велось испытание, составляла 1000°. Исследовались 8 образцов кокса. Оказалось, что при начальной температуре разложения пара независимо от того, была ли она высокой или низкой, получался газ состава: CO_2 — 33,3% и H_2 — 66,7%. Это явилось основанием для принятия следующей последовательности протекания реакций:

$$C + 2H_2O = CO_2 + 2H_2 \text{ и } C + CO_2 = 2CO.$$

Как показывает исследование (табл. 21), взаимодействие топлива с H_2O и CO_2 идет параллельно, и газовый кокс более пригоден для получения водяного газа, чем металлургический.

Начало разложения пара составляло для древесного угля 575°, для газового кокса — 700°, для металлургического кокса — 825° и для ретортного графита — 860°.

Тиле и Хаслам (1927) [81] исследовали взаимодействие водяного пара с активированным древесным углем, природным графитом, электродным углем для вольтовых дуг и ретортным углем при разных давлениях и разбавлении пара азотом. Разбавление азотом давало тот же результат, что и уменьшение давления (одно и то же парциальное давление). Ретортный уголь выше 1010° показал отрицательный порядок реакции, т. е. скорость реакции (количество пара, разложенного в единицу времени) уменьшалась с увеличением давления; остальные топлива и ретортный уголь ниже 1010° показали нулевой порядок (количество пара, разложенного в единицу времени, почти не менялось с давлением), что согласуется с данными Пекстона и Кобба. Результаты опытов с ретортным углем представлены на рис. 24. Сложный характер реакции объясняется Тиле и Хасламом возможностью протекания ее следующим образом:

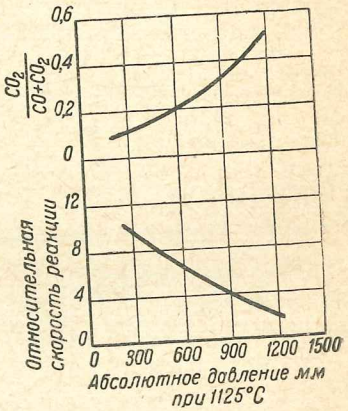


Рис. 24. Данные опытов Тиле и Хаслама

$$C_{обнаженный} * + 2H_2O = 2H_2 + C_xO_y; \quad (1)$$

$$C_xO_y = aC + bCO_2, \quad (2)$$

* Обнаженные атомы С получаются при разрушении C_xO_y и могут реагировать с H_2O, образуя вновь комплекс или прямо CO и H_2. Наблюдаемые явления можно объяснить, если реакция образования комплекса имеет более высокий порядок, чем реакция, дающая непосредственно CO и H_2.

или же

$$C_{обнаженный} + H_2O = H_2 + CO. \quad (3)$$

Допускается, что скорость реакции (2), меньшая, чем реакции (1), определяет разложение пара.

Предполагается, что во многих случаях реакция (3) менее важна, чем реакция (1), так как большая часть поверхности кокса покрыта комплексом C_xO_y.

Таблица 21

Данные исследований реакционной способности топлив

Наименование топлива	Разложение пара (в %)	Время для образования 100 см³ газа (в сек.)	Состав газа в (%)			H_2 расчетный (в %)	Остаток (в %)	Реакционная способность в отношении восстановления CO_2 (в % образовавшейся CO)
			CO_2	CO	H_2			
Древесный уголь	98	40	0,5	48,2	49,7	49,2	1,6	95
Газовый кокс . .	89	60	7,0	38,7	52,7	52,7	2,6	84
Кокс из вертикальных камер	87	65	8,3	35,5	52,9	52,1	3,3	66
Кокс из горизонтальных реторт	82	70	8,6	36,7	53,2	53,9	1,5	66
Кокс из вертикальных камер	79	70	9,9	34,3	54,0	54,1	1,8	64
Газовый кокс . .	80	90	10,7	33,6	54,7	55,0	1,0	52
Металлургический кокс	72	90	13,3	27,2	55,6	53,8	3,9	36
Ретортный графит	68	115	17,8	19,0	58,9	54,6	4,3	28

Если реакция (3) протекает в незначительной степени, то реакция (2) преобладает, и в конечном итоге реакция имеет нулевой порядок по отношению к пару, как было обнаружено с электродным углем, древесным углем и графитом при приведенных температурах и давлениях, и ретортным углем ниже 1010° С. При уменьшении давления пара число обнаженных атомов должно увеличиваться обратно пропорционально квадрату давления пара. В результате количество H_2O, разлагаемое по реакции (3), увеличивается с понижением давления, тогда как количество H_2O, разлагаемое по реакциям (1) и (2), сначала уменьшается. Когда реакция (3) даст заметное в общей сумме количество продуктов реакции, количество разлагаемого пара начнет повышаться с понижением давления и в то же время начнет увеличиваться относительное количество CO в фиксированных газах. Это наблюдается с ретортным углем.

При опытах также было установлено, что в интервале температур 1010—1125° скорость реакции с ретортным углем удваивается с повышением температуры на 25—30°.

К. Бунте и Гиссен (1930) ([32]) исследовали влияние реакционной способности кокса на образование водяного газа при температурах 600—1200°.

Опыты производились с вертикальной кварцевой трубкой диаметром в 20 *мм* и длиной в 750 *мм*, помещавшейся в электрической печи. Продолжительность соприкосновения газов и топлива составляла 0,7 сек.

Исследованию подверглись рудничный кокс, газовый кокс, древесный уголь и металлургический кокс из горизонтальных камер. В табл. 22 приведены некоторые данные из этих опытов.

В порядке понижения реакционной способности в отношении к водяному пару различные топлива расположились в той же последовательности, что и в случае углекислоты и воздуха, т. е. древесный уголь, полукокс, газовый кокс и металлургический кокс.

Таблица 22

Данные исследований реакционной способности топлив

Топливо	Температура опыта (в °С)	Состав газа (в %)				Разложение пара (в %)	$K_{опыт}$	$K_{выч}$
		CO_2	CO	H_2	N_2			
Древесный уголь	600	0,9	—	3,20	95,9	4,0	—	—
	800	5,0	5,1	17,8	72,1	52,4	0,87	0,82
	1000	0,2	23,2	24,1	52,5	96,9	3,37	1,60
Полукокс	700	0,64	1,1	5,5	92,8	5,7	—	—
	800	2,8	2,3	9,3	85,6	12,6	2,93	0,82
	1000	2,1	17,7	22,4	57,8	82,2	1,73	1,60
Газовый кокс	800	1,4	0,6	3,6	94,5	8,6	4,48	0,82
	1000	2,5	13,6	20,9	63,0	74,2	1,69	1,60
	1100	1,4	19,7	23,2	55,7	89,4	1,58	1,94
Кокс	900	2,5	2,4	8,6	86,5	19.6	1,99	1,19
	1000	4,1	7,5	16,1	72,3	50,4	1,77	1,60
	1200	0,7	23,1	24,3	51,9	93,0	2,07	2,60

Концентрация водяного пара в газовой смеси была тем больше, чем менее активен кокс, и всегда больше, чем это соответствует равновесию водяного газа. Полное равновесие вообще не достигалось.

Из данных исследования можно сделать вывод, что для топлив с высокой реакционной способностью—древесный уголь (буроугольный кокс) равновесие $CO + H_2O = CO_2 + H_2$ устанавливается при более низкой температуре; с повышением температуры $K_{опыт}$ превышает $K_{выч}$ вследствие восстановления CO_2 углеродом; для топлив с низкой реакционной способностью до 1000° $K_{опыт}$ больше $K_{выч}$ вследствие недостижения равновесия, и при 1000° $K_{опыт}$ и $K_{выч}$ совпадают. Выше 1000° вследствие протекания реакции $C + CO_2 = 2CO$ происходит отклонение от равновесия водяного газа.

Сравнительные исследования активности торфяного и каменноугольного кокса и древесного угля в отношении водяного пара производились Инсторфом (1931) ([83]). Для опытов служила вертикальная трубка диаметром в 15,9 *мм*, нагревавшаяся в электрической печи.

Высота слоя составляла 20 *см*, величина зерна — 3—5 *мм*, продолжительность опыта — 20 мин.

В табл. 23 и на рис. 25 приведены данные этих исследований, из которых можно сделать вывод, что торфяной кокс является более активным по отношению к водяному пару, чем другие топлива.

М. Дольх, Дитцель и Кольвиц (1931) [84] исследовали влияние реакционной способности топлива на получение водяного газа. Они вели опыты до значительного использования кокса, чтобы исследовать влияние разрушения структуры топлива на его реакционную способность.

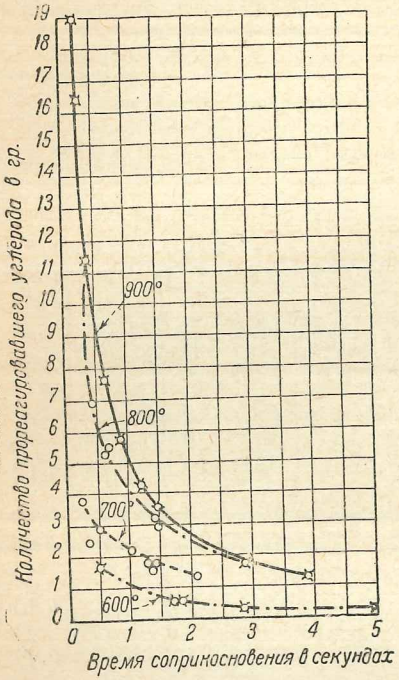


Рис. 25. Зависимость количества торфяного кокса, прореагировавшего с водяным паром, от температуры и продолжительности соприкосновения

Опыты проводились в электрической вертикальной печи с кварцевой трубкой. Трубка внизу сужалась и была снабжена холодильником, а вверху была соединена с источником пара; внизу и вверху трубка была заполнена кварцевыми черепками, а в середине коксом с частицами размером в 1—2 *мм*. Применялся кокс, выжженный в реторте при 1000°.

Температура опыта составляла 800° (для японского кокса 900°). Исследованию подверглись:

1) буковый кокс (0,8% золы),
2) швелькокс (22% золы),
3) А-уголь (из древесных отбросов, активированный газом; 1,5% золы).
4) буроугольный кокс,
5) металлургический кокс (7,2% золы) и
6) кокс из японских каменных углей (7,2% золы).

Было установлено, что с увеличением продолжительности опыта разложение пара и количество получаемого в единицу времени газа уменьшаются, а отношение $\frac{CO}{CO_2}$ изменяется. При активных топливах (буроугольный кокс, древесный уголь, А-уголь) с увеличением продолжительности контакта содержание CO_2 в газе повышается, а отношение $\frac{CO}{CO_2}$ сильно падает, при каменноугольном коксе — наоборот.

Авторы приходят к выводу, что механизм реакции зависит от строения угля, а следовательно и получаемого из него кокса. Они считают,

Таблица 23

Данные сравнительных исследований активности торфяного и каменноугольного кокса и древесного угля в отношении водяного пара

	Древесный уголь		Каменноугольный кокс			Торфяной кокс					
	800°	800°	800°	900°	900°	800°	800°	800°	900°	900°	900°
Навеска кокса или угля (в *г*)	10	12	24,5	24,5	24,5	20	20	20	20	20	20
Пропущено пара (в *г*)	1,10	3,853	1,837	1,73	4,68	1,01	2,21	3,77	1,61	2,19	4,44
Неразложенного пара (в *г*)	0,47	2,30	1,442	0,90	3,016	0,09	0,34	0,815	0,016	0,0535	0,322
» (в %)	42,7	59,7	78,5	52,0	64,4	8,9	15,4	21,6	1,0	2,44	7,25
Состав влажного газа (не содержащего азота) (в %)											
H_2O	32,50	49,40	68,55	43,51	51,79	4,86	8,65	12,92	0,52	1,23	3,88
CO_2	13,57	12,40	7,83	9,63	10,88	3,23	5,45	7,7	1,03	0,53	3,16
CO	16,38	8,50	3,37	12,55	7,08	43,47	36,45	31,38	47,78	48,70	42,69
H_2	37,55	29,70	20,25	34,31	30,25	48,44	49,43	48,00	50,67	49,54	50,27
Количество прореагировавшего углерода (в *г*):											
На образование CO_2	0,130	0,403	0,110	0,1589	0,4236	0,0397	0,1430	0,3236	0,0220	0,0150	0,1750
» CO	0,156	0,276	0,047	0,2061	0,2734	0,5403	0,954	1,3164	1,0180	1,4000	2,3850
Всего (в *г*)	0,286	0,679	0,157	0,365	0,697	0,580	1,097	1,640	1,040	1,415	2,5600
Количество углерода (в *г*/*см*³ *час*)	0,0117	0,0279	0,0064	0,0150	0,0286	0,0238	1,045	0,0673	0,0427	0,058	0,105

что изменение состава газа нельзя объяснить установлением равновесия $CO+H_2O=CO_2+H_2$, так как условия для установления равновесия были во всех случаях одинаковы и большой реакционный объем с кварцевыми черепками имел постоянную температуру. Авторы принимают протекание реакции $C+H_2O=CO+H_2$ для углей типа каменных и реакции $C+2H_2O=CO_2+2H_2$ — для углей типа бурых.

Авторами не было учтено при опытах влияние переменного количества пара и каталитического воздействия слоя топлива. Следует также отметить, что для кокса с высокой реакционной способностью равновесие реакции водяного газа устанавливалось при 800°. Для каменноугольного кокса при 800—900° даже при малых скоростях пара равновесие не устанавливалось даже приближенно, и $K_{опыт}$ значительно превышало $K_{выч}$. С наступлением равновесия реакции водяного газа величина отношения $\frac{CO}{CO_2}$ сильно падает почти во всех случаях, что, как указывает Дольх, свидетельствует о первичном протекании реакции $C+H_2O=CO+H_2$ и вторичном протекании реакции $CO+H_2O=CO_2+H_2$. При малоактивном коксе эта реакция отстает, и газ содержит больше CO и меньше — CO_2, чем это должно было быть (отношение $\frac{CO}{CO_2}$ большее).

Нейман, Крегер и Фингаз (1931) [85] исследовали реакционную способность различных топлив по отношению к водяному пару и влияние катализаторов.

При опытах реакционная трубка нагревалась до 510—987° в слегка наклонной электрической печи. Водяной пар разбавлялся азотом. Исследованию подверглись древесный уголь, сажа, активированный уголь и графит.

Размер кусков древесного угля составлял 1—2 *мм*. Уголь предварительно обрабатывался водяным паром и прокаливался в атмосфере азота. Начало реакции наблюдалось вблизи 500°.С повышением температуры разложение H_2O сильно росло. Равновесие водяного газа практически достигалось при 827°, но в газе оказались и тяжелые углеводороды (3,6%). Авторы считают, что большая реакционная способность древесного угля связана с большим содержанием в нем золы и углеводородных комплексов.

При опытах с ацетиленовой сажей (золы 0,2%) разложение водяного пара начиналось при 450° и количество разлагавшего пара медленно росло с температурой. При 810° значение $K_{опыт}$ (1,37) реакции водяного газа несколько приблизилось к $K_{выч}$ (0,98). Авторы считают, что высокая реакционная способность сажи обусловливается малым размером частиц и большой активной поверхностью топлива.

Опыты с активированным углем не могут быть использованы вследствие возникновения побочных реакций (отделение соляной кислоты, образование уксусной кислоты и циана).

В опытах с графитом с размером кусков в 1—2 *мм* и содержанием золы в 0,4% начало реакции наблюдалось при 730°. Реакция вначале шла вяло, и только при 987° устанавливалось равновесие водяного газа ($K_{опыт}$ — 1,52, $K_{выч}$ — 1,67).

При исследовании графита с добавкой 8% Fe_2O_3 реакция начиналась уже при 660°. Разложение водяного пара при 810° составляло 12%, против 7% при чистом графите.

Авторы принимают следующую схему протекания реакции:

$$C+2H_2O=CO_2+2H_2.$$
$$C+H_2O=CO+H_2.$$
$$C+CO_2=2CO.$$

П. Дольх (1931) [86] изучал реакцию $CO_2+H_2=CO+H_2O$ и наблюдал изменение величины $\frac{CO_2}{H_2}$ при высоких температурах в присутствии кокса. Опыты проводились в кварцевой трубке диаметром в 15 *мм*, заполненной на 10 *см* древесным углем или каменноугольным коксом и сверху и снизу — кусочками кварцевого стекла.

Опыт с трубкой, заполненной только кусочками кварцевого стекла, показал, что заметное взаимодействие между CO_2 и H_2 начиналось лишь выше 1000°; только при 1400° реакция приближалась к состоянию равновесия, т. е. при отсутствии катализаторов до 1000° эта реакция протекает вяло. О механизме процесса давало представление изменение объема смеси.

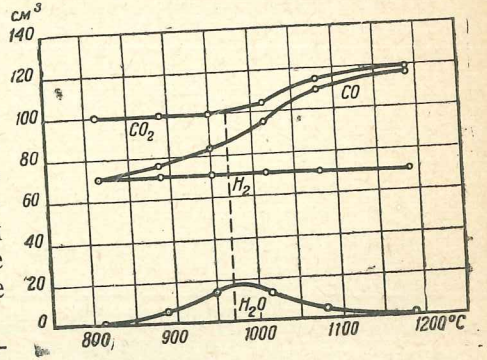


Рис. 26. Изменение состава газа с температурой в присутствии каменноугольного кокса

Отсутствие изменения суммарного объема CO_2+H_2 свидетельствует о возможности протекания только реакции $CO_2+H_2=CO+H_2O$. По наступлении реакции $C+CO_2=2CO$ объем газа увеличивается и является мерой протекания реакции с твердым С.

На рис. 26 представлены результаты опытов. При протекании только реакции $CO_2+H_2=H_2O+CO$ линия CO_2 находится на уровне 100. Протекание реакции газов с углеродом характеризуется увеличением объема вследствие реакции $C+CO_2=2=CO$.

В табл. 24 приведены значения $K_{опыт}$ и $K_{выч}$ реакции водяного газа.

Исследование показало:

1. При каменноугольном коксе до 970° идет восстановление CO_2 водородом без взаимодействия газов с углеродом кокса (постоянство объема). Происходит приближение к равновесию водяного газа, однако достаточно отдаленное. Выше 970° газы вступают во взаимодействие с углеродом кокса (увеличение объема). Содержание водяного пара падает вследствие реакции с углеродом, хотя при 1100° еще имеются в газе значительные количества водяного пара. С увеличением протекания реакции $C+CO_2=2CO$ равновесие водяного газа отдаляется.

2. При древесном угле до 820° идет восстановление CO_2 водородом без взаимодействия с твердым углеродом. Однако вследствие большой реакционной способности древесного угля равновесие водяного газа устанавливается уже при температуре несколько выше 750°. Выше 820° газы взаимодействуют с углеродом древесного угля. При 1000° в газе практически содержатся только CO и H_2. Выше 850° вследствие протекания реакции $C+CO_2=2CO$ происходит отход от равновесия водяного газа.

Таблица 24

Данные опытов П. Дольха

Температура (в °С)	Древесный уголь		Каменноугольный кокс	
	$K_{выч}$	$K_{опыт}$	$K_{выч}$	$K_{опыт}$
610	0,39	0,029	—	—
680	0,56	0,23	—	—
750	0,76	0,68	—	—
815	—	—	0,96	—
820	0,98	0,99	—	—
880	1,20	1,08	—	—
890	—	—	1,24	0,022
950	1,46	0,67	1,46	0,215
1010	—	—	1,69	0,72
1020	—	—	1,93	0,50

Опыты показывают, что при низких температурах равновесие водяного газа не устанавливается.

Сопоставление изменения объема и отклонения от равновесного состояния позволяют П. Дольху сделать вывод, что одновременно протекают две реакции $CO+H_2O=CO_2+H_2$ и $C+CO_2=2CO$.

Серия исследований над воздействием водяного пара на кокс и полукокс бурого и каменного угля и древесный уголь была проведена Терресом, Патчеке, Гофманом, Ковачем и Лером (1934) [87]. Кокс и полукокс приготовлялись в токе азота при различных температурах и обрабатывались до температуры на 10° ниже температуры коксования (400—1200°) водяным паром в смеси с азотом при насыщении последнего от 0 до 100°.

Опыты производились в кварцевой и фарфоровой трубках диаметром в 20 и 12 *мм*. Размер кусков кокса составлял 3 *мм*.

Продолжительность соприкосновения была велика. Она исчислялась на свободное реакционное пространство, но с учетом температуры и изменения объема при реакции.

Целью исследования было выявление влияния реакционной способности топлива и его предварительной перегонки на процесс разложения водяного пара и установление равновесия.

Угли подвергались сухой перегонке в электрической печи при 410—1210°.

До 1200° при каменноугольном коксе и продолжительности соприкосновения кокса с паром в 10—118 сек. разложение пара, содержание CO и взаимодействие C значительно отставали от равновесных значений и показателей при древесном угле. С увеличением температуры коксования реакционная способность угля понижалась.

При коксе и полукоксе из бурого угля также не достигалось полного равновесия по реакциям газификации. С повышением температуры опыта, уменьшением количества и скорости пара росла степень разложения пара. Влияние скорости пара было тем меньше, чем больше было разложение пара, т. е. чем быстрее достигалось равновесие. С увеличением температуры коксования до 700° реакционная способность буроугольного кокса повышалась, а выше 700° — понижалась, что объясняется соответствующими превращениями углеродистого вещества.

Низкая температура коксования каменного угля способствовала повидимому сохранению рыхлой структуры углерода. Для бурого угля, наоборот, при низких температурах недостаточное изменение структуры углерода ослабляло реакционную способность. Выше 700° повидимому имело место графитизация или уменьшение активной поверхности буроугольного кокса.

Степень разложения водяного пара при 400—500° была малой, тогда как теоретически разложение должно составить при этих температурах 30—50%. Разложение пара начиналось выше 700°. Разложение пара в течение первых секунд зависело от продолжительности соприкосновения. Оно вначале повышалось и в дальнейшем уменьшалось.

Равновесие реакции водяного газа $CO+H_2O=CO_2+H_2$ для древесного угля и каменноугольного полукокса устанавливалось при температурах выше 600° и особенно хорошо — выше 750°. Ниже 600° $K_{опыт}$ было выше $K_{выч}$. При буроугольном коксе и полукоксе установлению равновесия препятствовали побочные реакции.

Равновесие реакции $C+CO_2=2CO$ при опытах не достигалось, и содержание CO было значительно ниже теоретического. При буроугольном полукоксе содержание CO находилось между соответствующими значениями для каменноугольного кокса и древесного угля и теоретическими.

Террес и соавторы располагают различные топлива по увеличению их реакционной способности в следующей последовательности: графит, сажа, каменноугольные кокс и полукокс, древесный уголь, буроугольные кокс и полукокс.

Общее равновесие газификации связано с установлением двух частичных. Установление при опытах только одного из этих равновесий — равновесия водяного газа ($CO+H_2O=CO_2+H_2$) — приводит авторов к выводу об одинаковом отставании от равновесия других реакций — разложения пара и CO_2 углеродом.

Для выявления каталитического воздействия топлива авторы исследовали установление равновесия $CO+H_2O=CO_2+H_2$ в незаполненной фарфоровой трубке.

Они исходили как из CO и H_2O, так и из CO_2 и H_2. Равновесие при 600—1200° устанавливалось, но в значительный промежуток вре-

мени (70—509 против 6—127 сек. в присутствии древесного угля и каменноугольного кокса). Этим было доказано каталитическое воздействие поверхности древесного угля и кокса.

Из этих данных можно также сделать вывод, что реакция $CO+H_2O=CO_2+H_2$ в присутствии каталитически действующих поверхностей протекает легче, чем реакция $C+CO_2=2CO$, и равновесие реакции водяного газа может быть достигнуто при сравнительно низких температурах, тогда как равновесие Будуара обычно не достигается вплоть до высоких температур, т. е. реакция $C+CO_2=2CO$ не может являться основной вторичной реакцией.

Террес и соавторы на основании своих исследований также высказывают ряд соображений о последовательности протекания реакций. Они отмечают, что при равновесии водяного газа при небольшом разложении пара происходит образование большого количества CO_2 как при низких, так и при высоких температурах. Рассматривая составы газов, наиболее отклоняющиеся от равновесных (что имело место при каменноугольном коксе), они учли, что первичные процессы можно рассматривать только в случае замедления вторичных процессов, особенно, если равновесие водяного газа устанавливается настолько медленно, что можно знать, в каком направлении оно должно итти. Они нашли, что в рассматриваемых опытах содержание CO не увеличивается соответственно окончательному полному равновесию, а уменьшается под влиянием медленно устанавливающегося равновесия водяного газа. Отсюда авторы приходят к выводу, что в результате первичных процессов происходит образование водяного газа по реакции $C+H_2O=CO+H_2$.

Брюйер и Рейерсон (1934) [88] исследовали взаимодействие водяного пара с лигнитовым полукоксом и суббитуминозным коксом. Исследуемые топлива с размером зерен в 4,76—6,73 *мм* помещались в кварцевую или силлиманитовую реакционную трубку, через которую пропускался перегретый водяной пар. Исследуемое топливо выдерживалось при температуре опыта до прекращения выделения газов сухой перегонки. Объем H_2, полученного при данных условиях в единицу времени, был больше для суббитуминозного кокса, чем для лигнитового полукокса, что, по всей вероятности, обусловлено более сильным каталитическим воздействием золы кокса. При данной температуре содержание в газе H_2 и CO_2 увеличивалось, а CO — уменьшалось с увеличением количества подаваемого пара, т. е. с уменьшением времени соприкосновения и количества разложенного пара. С повышением температуры — при данном количестве пара — содержание CO_2 и H_2 в газе уменьшалось, а CO — увеличивалось. Так в интервале температур 600—1200° С для лигнитового полукокса и 900—1200° — для суббитуминозного кокса максимальное содержание H_2 имело место при наинизших температурах. Объем H_2, полученного при данном количестве пара в единицу времени, увеличивался с повышением температуры. Кривые зависимости содержания в газе отдельных компонентов при различных температурах от количества подаваемого пара для лигнитового полукокса представлены на рис. 27.

Предварительные опыты показали, что с увеличением давления возрастает количество разложенного пара и следовательно скорость

реакции. Состав газа почти не зависит от давления. Брюйер и Рейерсон пришли к выводу, что для получения водяного газа с высоким содержанием H_2 из кокса молодых углей необходимо работать с большим избытком пара (малое время соприкосновения) и при низких температурах. В условиях опыта наиболее благоприятным оказался температурный интервал 600—900°.

Приведенные выше исследования, несмотря на наличие отдельных противоречивых данных, позволяют сделать следующие выводы.

С повышением температуры скорость разложения водяного пара растет. При более низких температурах скорость реакции мало активных топлив отстает значительно больше, чем при высоких температурах. К числу весьма активных топлив следует отнести древесный уголь и торфяной и бурогольный полукоксы и коксы. Менее активным является каменноугольный полукокс и мало активным—каменноугольный кокс. Активность кокса в значительной степени зависит от способа его изготовления и реакционной поверхности. Опыты Клемента и Адамса, М. Дольха, Дитцеля и Кольвица, и Неймана, Крегера и Фингаза показали, что разложение пара вначале пропорционально продолжительности соприкосновения, по мере же приближения к равновесию рост разложения замедляется.

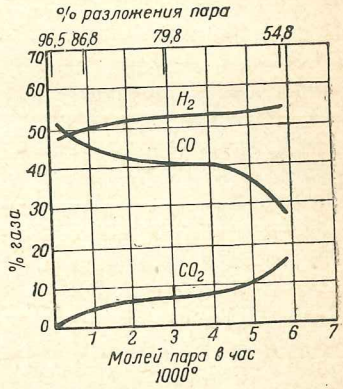


Рис. 27. Зависимость состава водяного газа и разложения пара от количества подаваемого пара

Состав получаемых газов при не очень большой продолжительности контакта определяется не столько условиями полного равновесия, сколько относительными скоростями реакции.

Механизм взаимодействия водяного пара с углеродом сложен и связан с образованием промежуточного углеродно-кислородного комплекса, распад которого повидимому наиболее тормозит процесс.

Согласно ряду исследований, часто при непродолжительном соприкосновении водяного пара и углерода получается много CO_2. Мало вероятна возможность ее получения при низких температурах за счет взаимодействия получаемой в качестве первичного продукта CO с водяным паром, протекающего при этих температурах с малой скоростью по реакции $CO+H_2O=CO_2+H_2$.

Поэтому многие исследователи (Лонг, Ланг, Ле-Нобель, Брендер, М. Дольх, Дитцель и Кольвиц, Науман и Пистор, Нейман, Крегер и Фингаз) принимают, что первичное взаимодействие протекает по реакции $C+2H_2O=CO_2+2H_2$ и что CO получается в результате последующего восстановления CO_2 углеродом.

Это положение опровергается другими исследованиями, при которых даже при низких температурах получались большие количества CO.

Часто принимают одновременное первичное образование CO_2 и CO и последующее изменение состава получаемых продуктов по реакции водяного газа (Клемент и Адамс, Хаслам, Гичкок и Рудей, Нейман, Крегер и Фингаз).

М. Дольх и Дитцель считают, что структура углерода влияет на первичное образование CO и CO_2; при буром угле получается CO_2, а при каменном — CO.

Исследования показывают, что вторичной реакцией в условиях каталитического воздействия топлива преимущественно является реакция $CO+H_2O=CO_2+H_2$.

Установление равновесия этой реакции наблюдалось при исследованиях для более активных топлив при более низкой температуре и для менее активных (каменноугольный кокс) — при более высокой. Смесь H_2O и CO в присутствии активных продуктов коксования приближается к равновесию еще до начала взаимодействия водяного пара с углеродом. Благодаря этой реакции при низких температурах в газе может содержаться много CO_2. При высоких температурах реакция $CO+H_2O=CO_2+H_2$ имеет меньшее значение, так как равновесие смещается в сторону CO, однако возможно и при высоких температурах образование по этой реакции CO_2.

Полное равновесие генераторного газа в условиях опытов не устанавливалось.

Получение даже при низких температурах больших количеств CO в газе и наблюдения над наиболее заметными при малоактивных коксах отклонениями в составе газов, полученных при опытах (Фрейфер, П. Дольх, Террес, Патчеке, Гофман, Ковач и Лер, Гвоздь, К. Нейман), от теоретических, соответствующих равновесному состоянию, позволяют сделать заключение, что первичное образование водяного газа идет исключительно или в большей степени по реакции $C+H_2O=CO+H_2$

Уже в некоторых приведенных исследованиях выяснилось с очевидностью влияние золы как катализатора на разложение водяного пара и установление равновесия. Ряд специальных исследований был посвящен этому вопросу, имеющему большое значение для возможности интенсификации процесса и получения газа надлежащего состава. Ниже приводятся данные по некоторым исследованиям.

Исследования Тейлора и Невиля (1921) [89] показали, что Na_2CO_3 и K_2CO_3 очень ускоряют газификацию. Факт ускорения реакции водяного газа Fe_2O_3 и отсутствие влияния на реакцию углерода с паром привели к мнению, что карбонаты щелочных металлов ускоряют реакцию $C+CO_2=2CO$, и образовавшаяся CO реагирует с паром, образуя H_2 и CO_2. Катализаторы оказывают ускоряющее влияние на разложение комплекса C_xO_y.

При исследовании Английским институтом инженеров-газовиков (1926) [91] влияния неорганических веществ на разложение пара был выбран кокс из угля с исключительно низким содержанием золы (1,3% золы — «чистый кокс»). К коксу добавляли 5% SiO_2, Al_2O_3, CaO, Fe_2O_3, $CaCO_3$ и Na_2CO_3 до коксования (при 800°, 6 час.). Газифицировали 10 *г* кокса, высушенного при 105°, с размером зерен в 5—8 *мм*. Опыты проводились при 1000°. Данные для кокса с добавкой SiO_2, Al_2O_3 и огнеупорной глины аналогичны результатам для чистого кокса.

Результаты с коксом, содержащим CaO, Fe_2O_3 и Na_2CO_3, очень различны. При добавке пара даже в большом количестве получались полное разложение и очень небольшие выхода CO_2.

На рис. 28 приведены кривые процентного разложения пара в зависимости от скорости подачи для различно обработанного кокса.

Сравнительную активность различных коксов можно выразить отношением:

$$\frac{\text{объем сухого водяного газа}}{\text{объем поданного пара}}$$

Эта величина постоянна для широкого интервала скоростей пара и для 100% разложения пара равна 2. При опытах эта величина имела следующие значения:

Чистый кокс	1,1
Кокс, содержащий CaO . . .	1,6
» » Fe_2O_3 . .	1,9
» » Na_2CO_3 .	2,1

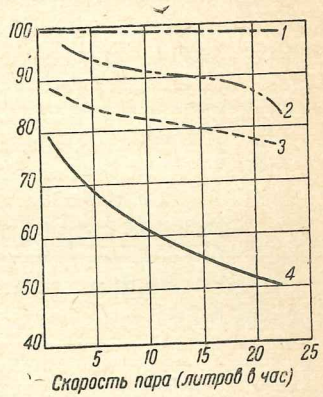


Рис. 28. Влияние каталитических добавок на разложение пара (ординаты — % разложенного пара):

1 — с добавкой Na_2CO_3, *2* — с добавкой Fe_2O_3, *3* — с добавкой CaO, *4* — чистый кокс

Последняя величина превышает теоретическую вследствие наличия в коксе летучих.

Сначала каталитическое воздействие приписывалось главным образом изменению в структуре кокса во время коксования, но оказалось, что можно получить те же результаты добавкой к коксу после коксования.

Очевидно, что разница гораздо сильнее выражена при более низких температурах; это важно с практической точки зрения, так как дает возможность предположить, что при нормальных коксах, для которых не было найдено большой разницы в составе и количестве золы, активность будет одинакова при температурах, имеющих место в генераторе водяного газа, независимо от способа коксования.

Ряд работ проведено Коббом с сотрудниками (1923, 1924, 1926 и 1927).

Кобб (1927) [90] пропускал над газовым коксом азот с различными добавками пара. При небольшой скорости подачи пара первичная реакция протекала по уравнению: $C+H_2O=CO+H_2$. Количество CO_2 возрастало с увеличением скорости пара, но это обусловливалось протеканием реакции водяного газа, а не образованием CO_2 из кокса.

Согласно исследованиям Кобба влияния добавок на взаимодействие кокса с водяным паром, свойства кокса при добавлении к нему Al_2O_3 и SiO_2 не изменялись; при добавках CaO, Fe_2O_3 и особенно Na_2CO_3 наблюдалось повышение реакционной способности.

В табл. 25 приведены некоторые данные исследования. При работе с чистым коксом при 1000° полученный газ содержал 5,2% CO_2, при-

чем подача пара составляла 2,5 *л/час* и скорость газификации — 1,15 *г* кокса в час из имевшихся 10 *г*. При добавлении SiO_2 данные не изменялись. При коксе с добавкой Fe_2O_3 содержание CO_2 в 5% было получено при скорости подачи пара в девять раз большей (21,9 *л/час*) и скорости газификации в 10,5 *г* кокса в час. При коксе с добавкой CaO содержание CO_2 в 5,4% было получено при скорости подачи пара в 11,2 *л/час* и скорости газификации в 5,2 *г* кокса в час. При добавке Na_2CO_3 и подаче пара в 21 *л/час* содержание CO_2 составило только 0,4%, а для получения 5% CO_2 в газе необходимо было уменьшить высоту слоя в 4 раза сравнительно с первоначальным. Таким образом скорость газификации могла быть повышена в 10 раз и больше без ухудшения качества газа.

При низких температурах влияние катализаторов более заметно. При 800°, подаче пара в 10 *л/час* и газификации 10 *г* чистого кокса газифицировалось 0,9 *г* кокса в час и в газе содержалось 18% CO_2. При добавлении Na_2CO_3 газифицировалось 5,8 *г* кокса в час и полученный газ содержал только 1,7% CO_2, т. е. при увеличении скорости газификации в 6 раз содержание CO_2 в газе уменьшилось в 10 раз.

Таблица 25

Скорость газификации кокса водяным паром в зависимости от добавок

Применяемый кокс	Вес кокса (в *г*)	Скорость подачи пара (в *л/час*)	Скорость газификации (в *г/час*)	CO_2 в газе (в %)	Температура слоя (в °С)
Чистый	10	2,5	1,15	5,2	1000
5% Fe_2O_3	10	21,9	10,5	5,0	1000
5% CaO	10	11,2	5,2	5,4	1000
5% Na_2CO_3	10	21,0	—	0,4	1000
	2,5	19,0	—	5.8	1000
Чистый	10	10,0	0,9	18,8	800
5% Na_2CO_3	10	10,0	5,8	1,7	800

Механизм каталитического воздействия Na_2CO_3 при газификации углерода водяным паром изучали Фокс и Уайт (1931) [31]. Они нашли, что при температурах выше 800° Na_2CO_3 реагирует с углеродом по реакции $Na_2CO_3 + 2C = 3CO + 2Na$.

Пары Na реагируют с водяными парами по реакции $2Na + H_2O = Na_2O + H_2$. Na_2O, взаимодействуя с CO_2, дает вновь Na_2CO_3.

Эти реакции происходят быстрее, чем прямое взаимодействие углерода с паром.

Б. Нейман, Крегер и Фингаз (1931) [93] изучали влияние на ход процесса разложения водяного пара добавления к графиту различных окислов.

При опытах с чистым графитом содержание CO_2 достигало максимума при 870°, что объясняется началом протекания реакции $C + CO_2 = 2CO$.

Добавка Fe_2O_3 или Fe_3O_4 (начало реакции 602°) обусловливала значительное увеличение разложения водяного пара сравнительно с чистым графитом (см. также выше, стр. 133); при опытах с CuO реакция начиналась при 420°; разложение пара до 650° шло медленно, при 871° почти закончилось. При добавке $Cr_2O_3 \cdot 3H_2O$ взаимодействие водяного пара с углем начиналось около 579°, при U_3O_8 — около 623° и при Al_2O_3 — около 632°. При добавке Cr_2O_3 образуется только половина CH_4, образующегося при других добавках (примерно столько, сколько при графите).

Особое место занимает добавка K_2CO_3: разложение водяного пара начинается при 550°, количество разложенного пара сильно растет (особенно сравнительно с чистым графитом). Содержание CO_2 достигает при 685° максимальной величины.

Авторы приходят к выводу, что при одних добавках при 773° равновесие водяного газа приближенно достигается, при других температурах и добавках значения *K* велики. Таким образом активирующее действие добавок при низких температурах ускоряет непосредственное воздействие водяного пара на уголь. Но добавки не являются одновременно катализаторами для реакции водяного газа $CO + H_2O = CO_2 + H_2$.

Авторы считают, что активирующее действие Fe_2O_3 состоит в переменном взаимодействии твердой фазы Fe_2O_3 и углерода. При CuO и U_3O_8 процесс аналогичен. Это объяснение неприменимо к Cr_2O_3 и Al_2O_3, при которых (при рассматриваемых температурах) никакого восстановления углерода не происходит. В этом случае авторы ссылаются на работы Хютига и его учеников над системой окись металла—вода, разъясняющие, что активирующее действие подобных добавок заключается в превращении газовых реакций в реакцию у твердой пограничной поверхности и при этом активность графита, смешанного с окислами, в части адсорбции и удерживания водяного пара значительно повышается. Этим обусловливаются повышение продолжительности соприкосновения между водяным паром и углем и усиление превращения. Для особого действия добавки K_2CO_3 принимается разложение его по реакции $K_2CO_3 + H_2O = 2KOH + CO_2$ или $K_2O \cdot H_2O + CO_2$ и воздействие C на адсорбированную или связанную K_2O воду.

Брюйер и Рейерсон (1935) [94] изучали влияние катализаторов на процесс газификации лигнитового полукокса при температурах 600, 700 и 800° (условия опыта см. стр. 136). При обработке полукокса катализаторами (K_2CO_3, Na_2CO_3, смесь 60% TiO_2 и 40% CuO — 5—20% по весу) выход водяного газа и H_2 в единицу времени увеличивался при прочих равных условиях. Влияние катализаторов, взятых в эквивалентных весах, было почти одинаково.

При вторичной обработке Na_2CO_3 уже газифицированного полукокса активность его была ниже.

Содержание H_2 в водяном газе, полученном из необработанного полукокса, возрастало после пропускания его через силлиманитовую трубку с катализатором. Наибольший выход H_2 был получен при применении катализатора, состоявшего из 67% MgO, 30% Fe_2O_3 и 3% $K_2Cr_2O_7$ и температуре 500°. Катализатор способствовал проте-

канию реакции $CO+H_2O=CO_2+H_2$. Также были проведены опыты с одновременной обработкой катализаторами полукокса и пропусканием водяного газа через катализатор, способствующий конверсии.

Результаты опытов представлены на рис. 29.

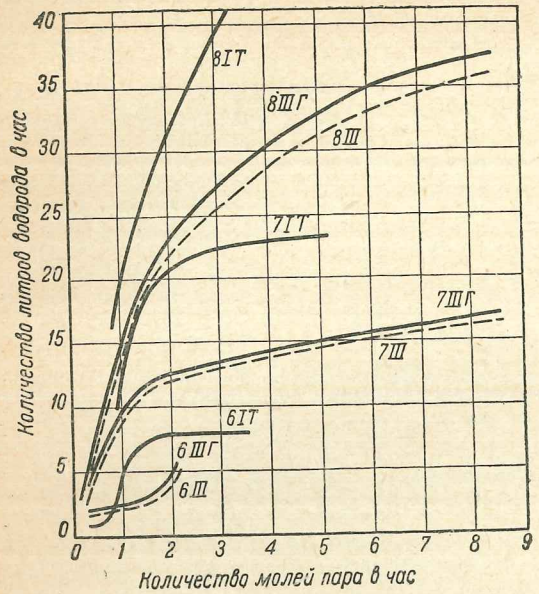


Рис. 29. Влияние каталитических добавок на разложение водяного пара:

Серия *I*. Каталитические добавки в топливе: *6 I* $T=600°$ С; *7 I* $T=700°$ С; *8 I* $T=800°$ С

Серия *III*. Газ пропускался через катализатор: *6 III Г* $-600°$ С; *7 III Г* $-700°$ С; *8 III Г* $-800°$ С — после катализа; *6 III* $-600°$ С; *7 III* $-700°$ С; *8 III* $-800°$ С — до катализа

Исследование процесса газификации на паровом дутье

При производстве водяного газа через слой раскаленного топлива пропускается снизу вверх или сверху вниз или же попеременно водяной пар, реагирующий с углеродом (газование). Пар применяется большей частью перегретый. При этом выделяется H_2, а кислород окисляет углерод топлива в CO и CO_2. Так как при этой реакции поглощается тепло, то температура раскаленного слоя быстро падает, и процесс получения водяного газа замедляется. Тогда прекращают подачу пара и через слой топлива пропускают струю воздуха (горячее дутье), сжигающую углерод в CO и CO_2 и повышающую температуру слоя топлива.

Пар и воздух впускаются попеременно, причем водяной газ отводится к месту потребления, а получаемые при воздушном дутье продукты полного и неполного сгорания или отводятся в атмосферу или в специальные камеры, где их сжигают и используют выделяющееся тепло. В генераторе водяного газа даже в отдельные периоды нет установившегося состояния; в период подачи воздуха температура слоя растет и увеличивается содержание CO в получающихся газах, а в период парового дутья температура слоя падает и уменьшается количество разлагаемого пара. Продолжительность периода воздушного дутья и повышения температуры в слое ограничивается шлакованием и потерей в химическом и физическом тепле продувочных газов, а периода парового дутья — уменьшением выработки водяного газа и потерей с неразложенным водяным паром.

Ввиду наличия периодических изменений в генераторах водяного

газа при исследовании рассматривают отдельные элементы процесса (воздушное и паровое дутье).

Ряд исследований в генераторах лабораторного и промышленного типов посвящен вопросам получения водяного газа. Одним из наиболее обстоятельных является исследование Штрахе и Ягода (1900 и 1903) [95, 96] о влиянии различных факторов на процесс газификации. Опыты Штрахе и Ягода проводились с газовым коксом в генераторе диаметром в 32 *см*. Высота слоя, скорость дутья и температура слоя топлива изменялись. Скорости были отнесены к свободному сечению генератора и холодному воздуху.

При опытах с воздушным дутьем ввиду затруднительности измерения температуры в слое средняя температура определялась по количеству аккумулированного в слое тепла и по температуре газов. При опытах высота слоя топлива составляла 0,87—2,7 *м* и скорость воздуха — 1,67—4,08 *м/сек*.

В табл. 26 приведены некоторые данные, свидетельствующие об уменьшении содержания в газах CO_2 с увеличением температуры и отсутствии увеличения содержания CO_2 (скорее — уменьшении) с увеличением скорости газов и уменьшением высоты слоя.

Таблица 26

Содержание CO_2 в продуктах воздушного дутья

Скорость дутья в *м/сек*	Высота слоя (в *м*)	Показатель	Продолжительность дутья (в минутах)							
			1	2	3	4	6	8	10	12
1,67	2,20	$\frac{CO_2}{t°C}$	18,0 685	15 720	12,4 780	10,8 795	8,5 870	7,2 905	5,8 970	5,6 1010
2,88	1,40	$\frac{CO_2}{t°C}$	19,6	16,0 660	12,7 750	10,2 835	7,2 1060	5,5 1140	4,7 1260	4,0 1370
4,08	1,20	$\frac{CO_2}{t°C}$	15,0 580	12,0 680	8,0 780	6,0 890	4,5 1230	4,3 1275	4,2 1295	4,1 1320

При постоянной подаче дутья вначале благодаря большему образованию CO_2 выделяется больше тепла, несмотря на меньшее выгорание углерода.

Несмотря на ненадежность определения температуры слоя, на основании опытов можно сделать вывод, что при всех скоростях дутья и высотах слоя с повышением температуры уменьшается содержание в газе CO_2 и высота слоя и скорость дутья в границах опыта не влияют на результат опыта.

К. п. д. периода воздушного дутья в значительной мере зависит от температуры отводимых газов, увеличиваясь с понижением температуры,

и характеризуется кривой N на рис. 30. До 800° к. п. д. высок, при 800° равен 55%, при 1000° он уже составляет 33%.

Согласно данным Дельвика, при увеличении интенсивности дутья содержание CO_2 увеличивается. Штрахе полагает, что это является заблуждением, так как, согласно опытам произведенным Штрахе и Ягода, при максимальных примененных скоростях — до 4 *м/сек* (считая на все сечение генератора) — содержание CO_2 не увеличивается.

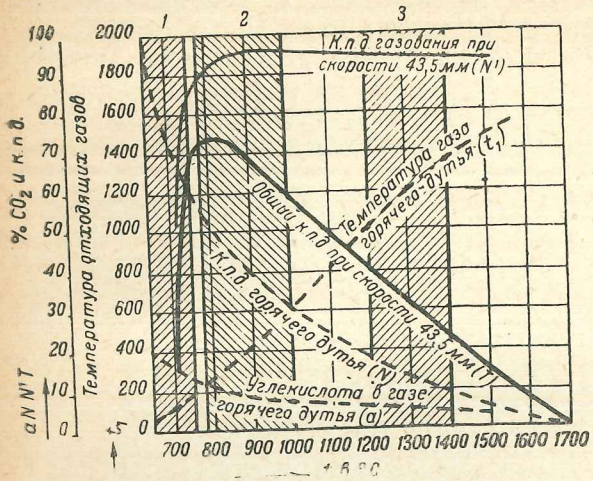


Рис. 30. Характеристика и к. п. д. различных процессов получения водяного газа

Штрахе считает, что получение большого количества CO_2 могло иметь место лишь при низких температурах в генераторе, не выгодных для получения водяного газа в силу малой интенсивности разложения водяного пара или же необходимости подачи пара с очень малой скоростью.

При исследовании зависимости между температурой в генераторе, скоростью пара, степенью разложения водяного пара и содержанием CO_2 после воздушного дутья (до подачи пара) замерялась температура наиболее горячего слоя топлива и после подачи пара замерялась температура газа. Соотношение между температурой в нижней части и средней температурой в генераторе было установлено отдельными опытами.

Пар вводился сверху со скоростью в 4,2—153,5 *мм/сек*.

Из опытов были сделаны следующие выводы:

1. При постоянной температуре в генераторе с увеличением скорости пара уменьшается степень разложения его (рис. 31) и увеличивается содержание в газе CO_2,

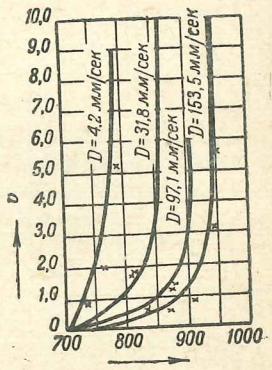


Рис. 31. Зависимость степени разложения водяного пара от его скорости (по оси абсцисс t в °С)

Из опытов Штрахе и Ягода может быть установлена следующая зависимость процесса от скорости пара:

$$v = 5\delta + (\delta\tau^2)^5,$$

где v — отношение количества разложенного пара к неразложенному,

$$\tau = \frac{t - 700}{100}, \qquad \delta = \frac{\tau^2}{D \cdot 0{,}138};$$

здесь t — средняя температура в генераторе и D — скорость пара в *мм/сек*, подсчитанная на свободное сечение генератора.

Формула пригодна для температур (t) больше 700°.

2. При постоянной подаче пара с повышением температуры увеличивается разложение пара и уменьшается содержание CO_2.

3. При достаточном уменьшении скорости пара содержание его в газе может быть значительно снижено даже при низких температурах.

Как показывают исследования, при очень малой скорости пара (4,2 *мм/сек*) потеря в окружающую среду снижает к. п. д. газования; при большей скорости (31,8 *мм/сек*) вследствие сравнительно низкой температуры газов к. п. д. высок. При большой скорости пара вследствие увеличения количества неразложенного пара и уноса с ним тепла к. п. д. понижается. Наиболее высокий к. п. д. газования в условиях опыта оказался при скорости пара в 43,5 *мм/сек*, для которой приведены данные на рис 30. Как видно из рисунка, к. п. д. газования низок до 750° вследствие малого разложения пара. В дальнейшем, достигнув максимума при 900°, он медленно понижается.

С повышением температуры к. п. д. воздушного дутья сильно уменьшается, так как помимо увеличения количества физического тепла увеличивается потеря CO в продуктах воздушного дутья. Общий к. п. д. изменяется соответственно к. п. д. воздушного и парового дутья. При более высоких температурах к. п. д. воздушного дутья значительно понижает общий к. п. д.

Оптимальная величина общего к. п. д. имеет место при 750—1000°, при меньших температурах использование ухудшается вследствие малого разложения пара, при более высоких — вследствие высокой температуры отводимых газов.

На рис. 30 разграничены области, соответствующие опытам по Дельвику, Штрахе и Гумфрею. Цифрой *1* помечена область, соответствующая опытам Дельвика, цифрой *2* — опытам Штрахе и цифрой *3* — опытам Гумфрея.

Штрахе рекомендует вести процесс получения водяного газа при средних температурах, при которых к. п. д. процесса еще достаточно высок, содержание CO_2 в отходящих газах составляет 7—12% и в условиях практически пригодной скорости пара имеет место достаточное разложение пара.

В среднем количество разлагаемого пара составляет 50—70% от общего [97]. Увеличение содержания CO_2 в водяном газе в период газования видно из табл. 27.

Исследование влияния высоты слоя топлива на ход процесса производилось [98,99] Fuel Research Board (1923) и Институтом инженеров-газовиков. Основные результаты исследований приведены в табл. 28. Они свидетельствуют о том, что при одинаковой высоте слоя возможно получение самых разнообразных результатов ввиду их зависимости от температуры, связанной с применяемым циклом операций. Также и

Таблица 27

Изменение состава водяного газа (в %) в период дутья пара (подача пара сверху)

Состав	В первые 2 мин.	В следующие 2 мин.	В последние 2 мин.
CO_2	2,95	5,30	8,55
O_2	0,45	0,30	0,10
CO	45,60	39,50	34,20
H_2	44,95	51,20	53,00
CH_4	0,10	0,05	0,10
N_2	5,90	3,60	4,05
Теплотворная способность газа (в *кал/м³*)	2065	2065	1990

при невысоком слое можно получить газ высокого качества, однако более вероятно получение газа низкого качества с большим содержанием CO_2. Производительность при невысоком слое падает без заметного понижения к. п. д.

Таблица 28

Влияние высоты слоя топлива и производительности на получение водяного газа

	Исследование А					Исследование Б			
	Высота слоя (в *м*)								
	1,2	1,3	1,5	1,8	2,1	0,9	1,05	1,2	2,1
К. п. д.	50,7	47,0	53,3	56,1	52,2	54,7	57,8	59,9	57,8
% CO_2 в продувочных газах	13,6	16,2	11,8	12,1	12,2	19,5	19,03	19,06	14,55
% CO_2 в водяном газе	4,7	8,2	5,5	4,5	4,2	8,30	5,30	6,00	4,50
Производительность в сутки (в *м³*)	10 300	8700	16 000	17 400	16 000	6700	6500	6200	10 700

Рассмотрение данных также показывает, что наибольшее содержание CO_2 в водяном газе соответствует наибольшему количеству неразложенного пара и что наименьшие потери в потенциальном тепле газа воздушного дутья в 11,5% в опыте Б компенсируются более высокими потерями в неразложенном паре, большим теплосодержанием

отходящих газов и расходом пара на установку и уменьшением скорости получения водяного газа.

Серия исследований процессов, протекающих в генераторах водяного газа, производилась в генераторе малых размеров с пятью различно полученными коксами (в печах периодического и непрерывного действия) комитетом по карбонизации Американского газового объединения (AGA) (Хаслам, Вард и Войд) [100]. Опыты проводились при скоростях воздуха в 38,7; 46,7; 57,9 и 70,2 *м³* на 1 *м²* сечения при продолжительности дутья в 5 мин.

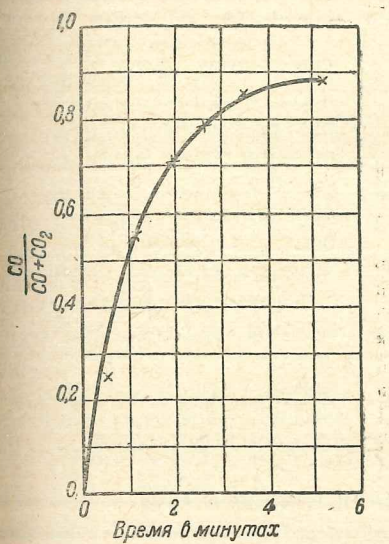


Рис. 32. Изменение отношения $\frac{CO}{CO+CO_2}$ в период воздушной фазы

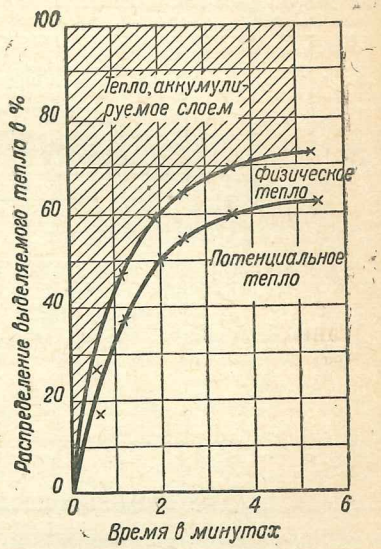


Рис. 33. Распределение тепла в период воздушной фазы

Изучалось распределение тепла в теплосодержании и потенциальном тепле газов воздушного дутья и в тепле, аккумулированном слоем.

При малых скоростях количество тепла, аккумулируемого слоем кокса, составляло в зависимости от вида кокса 27,7—33,9% и при больших скоростях — 22,7—31,6%, т. е. колебалось довольно значительно. Значительно (в $1^1/_2$ раза) изменялось и содержание CO и CO_2 в газах. Типичные кривые, характеризующие исследование, приведены на рис. 32 и 33.

Опыты показали, что тепло, аккумулированное слоем топлива, несколько уменьшалось с увеличением скорости. Отношение $\frac{CO}{CO+CO_2}$ увеличивалось со скоростью; для высоты слоя в 1,2 *м* это увеличение было незначительным. Увеличение отношения $\frac{CO}{CO+CO_2}$ со скоростью соответствует также приведенным выше исследованиям Штрахе и

Ягода и противоречит указанию авторов, что в нижней части слоя происходит сгорание С в CO_2. Независимость отношения $\frac{CO}{CO+CO_2}$ от скорости дутья или даже увеличение его с увеличением скорости должно свидетельствовать о значительном первичном получении и сохранении в газе CO.

Исследования зависимости разложения пара от вида кокса при скорости в 10 и 20 *кг/м²* в минуту и слое — в 1,2 *м* при пятиминутном газовании показали, что для принятых пределов степень разложения пара мало зависела от вида кокса.

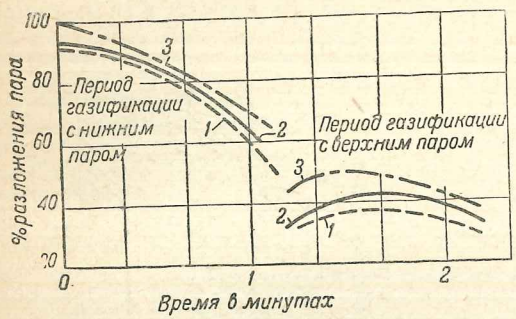


Рис. 34. Изменение количества разлагающегося пара в течение фазы и в зависимости от количества пара:

1 — скорость воздуха 365 *м³/мин.*, пара 100 *кг/мин*
2 — » » 365 » » 90 »
3 — » » 370 » » 87 »
Горячее дутье—38% цикла, газование — 62% (верхний пар — 54%, нижний — 8%)

Дальнейшие опыты AGA (1929) [211], произведенные в механизированном генераторе промышленного типа, показали, что с уменьшением подачи пара в первую минуту газования степень разложения пара увеличивалась (рис. 34) и что с незначительным уменьшением высоты слоя топлива разложение пара может несколько увеличиться вследствие совместного влияния уменьшения высоты и повышения температуры.

Расчеты к процессу получения водяного газа

Равновесные составы водяного генераторного газа подсчитаны Рейндерсом [102] для давления в 1 *ат* и разных температур и выражены в виде кривых на рис. 35. В условиях газификации полное равновесие не успевает установиться.

Из рисунка видно, что при низких температурах в равновесной смеси содержится много водяного пара и значительное количество CO_2 и CH_4 (максимум при 300—400°). С повышением температуры падает содержание H_2O, CO_2 и CH_4 и растет содержание CO и H_2, достигая максимума примерно к 900°. Хотя ход так называемой реакции водяного газа не зависит от давления, однако равновесие водяного газа зависит от давления, так как реакции получения водяного газа (4) и (5) идут с увеличением объема, причем большее увеличение объема имеет место при реакции (4).

Идеальный водяной газ по реакции (4) имел бы состав: H_2 — 50%, CO — 50% и высшую теплотворную способность в 3036 *кал/м³*, а по реакции (5): H_2 — 66,67% и CO_2 — 33,33% и высшую теплотворную способность в 2035 *кал/м³*.

Расчеты, относящиеся к процессу получения водяного газа, осложнены необходимостью учета количества тепла, затраченного в период воздушного дутья и аккумулирования тепла слоем топлива.

Приводимые ниже расчеты Штрахе и Ягода основываются на результатах их опытов. Они произведены в предположении, что газифицируется чистый углерод, к водяному газу не примешиваются продукты воздушного дутья и не учитываются потери в окружающую среду.

К. п. д. периода воздушного дутья *N* может быть определен из выражения:

$$N = \frac{\text{воспринятое слоем тепло} \times 100}{7944^* \times \text{количество сожженного С}}\ \%.$$

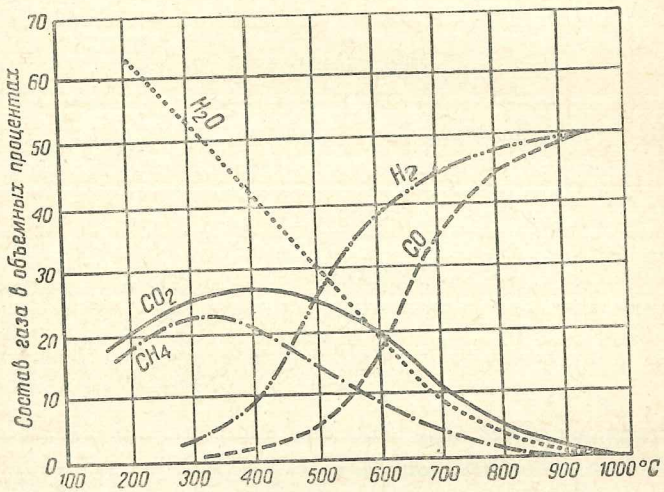


Рис. 35. Равновесные составы водяного газа по Рейндерсу

Если пренебречь потерями и принять, что количество образовавшейся CO_2 равно *a*% и CO (по предыдущему) равно 34,7—1,65 *a*, а также учесть, что при образовании 1 *кг-мол* CO_2 выделяется 95 407 *кал* и при образовании 1 *кг-мол* CO выделяется $\frac{55\,514}{2}$ *кал*, то количество выделившегося тепла на 100 мол. газа составит:

$$a \cdot 95\,407 + (34{,}7 - 1{,}65\,a) \cdot \frac{55\,514}{2} = 963\,000 + 49\,600\,a,$$ или на 1 *м³* газа:

$$\frac{963\,000 + 49\,600\,a}{22{,}4 \cdot 100} = 430 + 22{,}1\,a \text{ кал}.$$

Согласно предыдущим расчетам, на *L* *м³* воздуха получается воздушного газа:

$$L = \frac{100}{0{,}827\,(a + 100)}\ м^3,$$

* $\frac{95\,407}{12{,}01} = 7944.$

и количество выделившегося тепла составляет:

$$\frac{43\,000 + 2210\,a}{0{,}827\,(a + 100)}\ кал.$$

Значительная часть выделяющегося при воздушном дутье тепла уносится из генератора с отходящими газами. При опытах Штрахе при температурах в генераторе от 800 до 1200° температура отходящих газов t_1 была примерно равной:

$$t_1 = 1{,}95\,t - 1330,$$

где t — средняя температура в генераторе.

Потеря тепла с газами воздушного дутья соответственно температуре их t_1 составляет:

$$Lt_1\,\frac{a\,(0{,}086 + 0{,}000347\,t_1) + 30{,}69}{0{,}827\,(a + 100)}.$$

Углерод, сожженный на L $м^3$ воздуха, по предыдущему равен:

$$C = L\,\frac{18{,}6 - 0{,}348\,a}{0{,}827\,(a + 100)}.$$

Таким образом к. п. д. периода воздушного дутья, если пренебречь другими потерями, помимо потери с отходящими газами, составляет:

$$N = \frac{43\,000 + 2210\,a - t_1\,[a\,(0{,}076 + 0{,}000347\,t_1) + 30{,}69]}{(18{,}6 - 0{,}348\,a)\cdot 7944}.$$

Пунктирная кривая N на рис. 30 показывает, что при температуре 650° к. п. д. составляет больше 95% и быстро падает с повышением температуры отходящих газов, достигая нуля при 1700° (к. п. д. подсчитан для каждой отдельной температуры процесса).

Охлаждение генератора в период газования вызывается эндотермическим процессом образования водяного газа, уносом тепла (физического) газами и потерями генератора в окружающую среду.

Если обозначить через A полное охлаждение генератора на 1 $м^3$ водяного пара, через B — тепло образования 1 $м^3$ водяного газа, через E — теплосодержание 1 $м^3$ водяного газа и приходящейся на его долю влаги, через s — потерю в окружающую среду в 1 мин. и через g — количество водяного газа в $м^3$, полученного в 1 мин., то

$$A = B + E + \frac{s}{g}.$$

Тепло образования водяного газа B зависит от содержания CO_2 в газе. На 1 часть CO_2 образуется 2 части H_2, т. е. всего 3 части газа; остаток же состоит из смеси равных объемов в CO и H_2, т. е. при содержании CO_2 в c частей в газе дополнительно должно иметься:

$$\frac{100 - 3\,c}{2}\ частей\ CO$$

и столько же H_2, и состав газа является следующим:

CO_2 — c частей;

CO — $(50 - 1{,}5\,c)$ частей

и

H_2 — $(50 - 1{,}5\,c + 2\,c) = (50 + 0{,}5\,c)$ частей;

в сумме — 100 частей.

Потребление тепла при образовании c% CO_2 равно:

$$\frac{c}{100}\cdot 20\,195\ кал,$$

и по реакции образования CO равно:

$$\frac{50 - 1{,}5\,c}{100}\cdot 30\,044 = (15\,020 - 451\,c)\ кал.$$

Полное потребление тепла, считая на 1 $м^3$ полученного газа, равно

$$\frac{15\,020 - 451\,c + 202\,c}{22{,}4} = (671 - 11c)\ кал.$$

Что касается величины $\frac{s}{g}$, определяющей потерю в окружающую среду, то она в значительной мере зависит от интенсивности работы генератора.

Теплотворная способность полученного газа, считая по нижнему пределу (CO — 3018 $кал/м^3$ и H_2 — 2579 $кал/м^3$), равна:

$$Q = \frac{50 - 1{,}5\,c}{100}\cdot 3018 + \frac{50 + 0{,}5c}{100}\cdot 2\,579 = (2800 - 32{,}4c)\ кал/м^3.$$

К. п. д. периода газования N' получим, как частное от деления значения теплотворной способности газа на сумму теплотворной способности прогазифицированного углерода $(7944\,c')$ и тепла A, отданного слоем, т. е.

$$N' = \frac{Q}{c'\cdot 7944 + A}\,100\%.$$

Учитывая содержание в 1 $м^3$ CO_2 или CO углерода в количестве 0,536 $кг$, количество прогазифицированного углерода на 1 $м^3$ газа получаем равным:

$$c' = \left(\frac{c}{100} + \frac{50 - 1{,}5\,c}{100}\right)\cdot 0{,}536 = \frac{50 - 0{,}5\,c}{100}\cdot 0{,}536\ кг.$$

На рис. 30 значения к. п. д. периода газования представлены в виде кривой N'.

Из рисунка видно, что это значение быстро растет при температурах 700—800°, достигая наивысшего значения в 95%, и при более высоких температурах несколько падает.

Быстрое падение к. п. д. при низких температурах является следствием того, что большое количество пара проходит слой неразложенным. При высоких температурах к. п. д. несколько понижается вследствие увеличения теплосодержания газов, что для периода газования особого практического значения не имеет.

К. п. д. повышается при применении перегретого пара.

Общий эффект получения водяного газа зависит также от периода воздушного дутья. Если обозначить к. п. д. периода воздушного дутья через N, то расход тепла в этот период составит:

$$\frac{A}{N} \cdot 100$$

и общий к. п. д. будет равен:

$$T = \frac{Q}{c' 7944 + \frac{A}{N} \cdot 100}.$$

Величина A, следовательно и T, в значительной мере зависит от теплосодержания газов воздушного дутья и к. п. д. этого периода.

Кривая T (общий к. п. д.) на рис. 30 относится к случаю скорости пара в 43,5 *мм/сек*.

Общий к. п. д. равен нулю при понижении до нуля к. п. д. газификации вследствие низкой температуры слоя, так как при этом водяного газа не образуется. Он также равен нулю при к. п. д. периода воздушного дутья, равном нулю, так как при этом в слое не аккумулируется тепло. Это может быть в случае, если температура газов составит 1700° и газы унесут все тепло из генератора.

В интервале температур 750—1000° общий к. п. д. достигает наивысшего значения (максимум 73%).

Содержание CO_2 (кривая *а*) в продуктах горячего дутья, соответствующее интервалу температур 750—1000°, равно 7—14%.

В конечном итоге к. п. д. получения водяного газа и выхода последнего зависят от температур, при которых протекают процессы, и от скорости пара.

Для выявления примерных соотношений в случае учета примешивания к водяному газу H_2 из топлива и газов воздушного дутья, а также потерь в окружающую среду рассмотрим получение водяного газа состава: CO_2 — 5%, CO — 40%, H_2 — 49% и N_2 — 6%. Процесс можно представить идущим следующим образом.

Из топлива (кокса) при нулевом тепловом эффекте сухого разложения выделяется на 100 частей газа 1 часть H_2; кроме того остается от продуктов воздушного дутья 5 частей N_2 и 1 часть CO_2. Таким образом в зоне газификации получается: 49 — 1 = 48 частей H_2, 5 — 1 = 4 части CO_2 и 40 частей CO. Можно принять, что 4 части CO_2 получились по реакции $CO + H_2O = CO_2 + H_2$. Следовательно можно принять (на 1 $м^3$ сухого газа):

по реакции $C + H_2O = CO + H_2$ получается: 0,44 $м^3$ CO и 0,44 $м^3$ H_2;

по реакции $CO + H_2O = CO_2 + H_2$ 0,04 $м^3$ CO реагирует с 0,04 $м^3$ H_2O с получением 0,04 $м^3$ CO_2 и 0,04 $м^3$ H_2.

Затрата тепла по реакциям:

$$-\frac{30\,044}{22,4} \cdot 0,44 = -590 \text{ кал}; \quad \frac{9849}{22,4} \cdot 0,04 = +18 \text{ кал}.$$

Всего — 572 *кал* на 1 $м^3$ сухого газа.

Если диаметр генератора — 3,6 *м*, высота слоя — 1,5 *м*, объемный вес кокса — 450 *кг*/$м^3$, производительность по водяному газу — 5500 $м^3$/*час*, число циклов — 15 в час, содержание пара на 1 $м^3$ сухого газа — 0,3 $м^3$, температура газов 550°, количество вводимого пара — 0,7 *кг* на 1 $м^3$ сухого газа, температура пара 300°, теплоемкость кокса — 0,36 *кал*/*кг* и газов — 0,34 *кал*/$м^3$ и потеря тепла в окружающую среду равна 100 *кал* на 1 $м^3$ сухого газа и если пренебречь физическим теплом шлака, то полный расход тепла при получении водяного газа, который должен быть аккумулирован слоем, составит на 1 $м^3$ сухого газа:

$$572 + 0,34 \cdot 550 \cdot 1,3 + 100 - 0,48 \cdot 300 \cdot 0,7 = 815 \text{ кал}.$$

Вес кокса в генераторе:

$$\frac{3,14 \cdot 3,6 \cdot 3,6}{4} \cdot 1,5 \cdot 450 = 6850 \text{ кг}.$$

Количество газа, получаемого в течение цикла:

$$\frac{5500}{15} = 367 \text{ м}^3.$$

Среднее изменение температуры кокса:

$$\Delta t = \frac{367 \cdot 815}{6850 \cdot 0,36} = 121 \text{ °C}.$$

Ввиду недостаточно высокой теплопроводности кокса неизбежно неравномерное изменение температуры кусков по сечению.

Если состав продуктов воздушного дутья: CO_2 — 14%, CO — 11% и N_2 — 75%, то при образовании 1 $м^3$ выделяется тепла:

$$\frac{95\,407}{22,4} \cdot 0,14 + \frac{55\,514}{2 \cdot 22,4} \cdot 0,11 = 732 \text{ кал}.$$

Пренебрегая содержанием влаги в отходящих газах, принимая их температуру равной 750°, теплоемкость — 0,36 и потерю в окружающую среду равной 50 *кал*, получим количество тепла, могущее быть использованным на 1 $м^3$ для подогрева слоя топлива, равным:

$$732 - 750 \cdot 0,36 - 50 = 412 \text{ кал}.$$

Требуется продуктов воздушного дутья на 1 $м^3$ сухого водяного газа:

$$815 : 412 = 1,98 \text{ м}^3.$$

Если относить к. п. д. к теплотворной способности топлива и оценить потери в уносе и провале в 5%, получим:

$$\text{к. п. д. горячего дутья} = \frac{815 \cdot 100 \cdot 100}{1{,}05 \cdot 0{,}536\,(14{,}0 + 11{,}0) \cdot 1{,}98 \cdot 7944} = 37{,}0\%.$$

К. п. д. газования (по низшей теплотворной способности) =

$$= \frac{(2579 \cdot 0{,}48 + 3018 \cdot 0{,}40) \cdot 100}{1{,}05 \cdot 0{,}536\,(0{,}40 + 0{,}04) \cdot 7944 + 815} = \frac{2445 \cdot 100}{1963 + 815} = 87{,}6\%.$$

$$\text{Общий к. п. д.} = \frac{2445 \cdot 100}{1963 + \frac{815}{0{,}370}} = 60\%.$$

При расчете по высшей теплотворной способности к. п. д. газования составит 95,8% и общий — 65,7%.

Если учесть теплосодержание вводимого пара и потерю части водяного газа с продуктами горячего дутья, к. п. д. соответственно понизится.

Соображения о ведении процесса получения водяного газа

Требования, предъявляемые в отдельных стадиях процесса к состоянию генератора, являются до известной степени противоречивыми. В период воздушного дутья с точки зрения более полного разложения пара желательно получение максимальных температур, с точки же зрения уменьшения потерь с продуктами воздушного дутья, связанных с их нагревом и образованием больших количеств CO, желателен возможно меньший разогрев слоя.

Аналогичны соображения и в части высоты слоя. Этим объясняется и различная работа отдельных установок.

В основном можно руководствоваться следующими соображениями.

1. Воздушное дутье В противоположность обстоятельствам, имеющим место при получении воздушного газа, при горячем дутье стремятся получить максимальное количество CO_2 в газе и следовательно максимальное выделение тепла в самом генераторе для подогрева слоя: на единицу C по реакции (2) выделяется в три с лишним раза больше тепла, чем по реакции (1). Больше CO_2 образуется при низких температурах; но так как для интенсивного разложения H_2O желательны более высокие температуры, поддерживаются средние температуры слоя.

Увеличение скорости воздушного дутья уменьшает продолжительность разогрева слоя, т. е. повышает производительность. При этом теплообмен газов в верхнем слое вследствие улучшения условий теплопередачи почти не ухудшается ввиду улучшения теплопередачи с увеличением скорости газов. Предел для скорости воздуха определяется уносом топлива из газогенератора и увеличением расхода энергии на воздуходувку.

Если только нет особых требований получения газа с очень высокой теплотворной способностью, не следует излишне затягивать воздушное дутье во избежание больших потерь с физическим и потенциальным теплом газов.

2. Газование. В период газования количество неразложенного пара и содержание CO_2 растет с понижением температуры слоя топлива, т. е. уменьшается производительность, ухудшается качество газа и увеличиваются потери. Поэтому тщательно следят, чтобы продолжительность парового дутья не была превышена. Желателен перегрев пара.

3. Свойства топлива. Весьма важным является равномерное распределение водяного пара и газов по сечению. Для этого топливо должно иметь равномерный размер кусков и зола должна быть достаточно тугоплавкой во избежание шлакования. Важнее применять топливо с низкой реакционной способностью в отношении CO_2, чем с высокой — в отношении водяного пара, так как к. п. д. мало изменяется от скорости образования водяного газа и сильно понижается с увеличением содержания CO в газах воздушного дутья.

Следует также отметить, что способ получения кокса повидимому в большей степени влияет на получение CO в газах воздушного дутья, чем на разложение пара.

4. Высота слоя топлива. Высота слоя топлива в генераторах водяного газа обычно не превышает 2 *м*. При выборе высоты слоя руководствуются соображениями качества самого топлива (размер кусков, реакционная способность), сопротивления слоя, скорости газов и продолжительности периодов дутья. Чем выше слой топлива, тем холоднее газы, выходящие из генератора, тем больше разложение пара, тем больше сопротивление слоя и расход энергии и тем больше CO находится в продуктах горячего дутья.

В отношении выбора высоты слоя и режима генератора нет вполне установленных правил. Возможна работа с низким слоем топлива, сильным воздушным дутьем и малым расходом пара или с высоким слоем топлива и большей производительностью генератора.

Имеющиеся материалы не дают возможности сделать надежные выводы о влиянии высоты слоя на режим, но указывают на возможность работы при различных условиях.

Продолжительность циклов и отдельных стадий и последовательность последних

Температура слоя топлива зависит от относительных количеств проходящих воздуха и пара. Изменение подачи воздуха или пара вызывает изменение всех соотношений. Так при увеличении подачи воздуха и неизменной подаче водяного пара в слое аккумулируется больше тепла и температура слоя повышается; возникающие при этом увеличение потери с CO и физическим теплом газов и увеличение разложения пара и уменьшение CO_2 в водяном газе снижают количество аккумулируемого слоем тепла.

Таким образом соотношение количества пара и воздуха и продолжительности воздушного дутья и газования определяют температуру слоя и состав газов.

При дутье снизу нижняя часть слоя топлива сильно охлаждается, а верхняя остается горячей. Это способствует получению в период

дутья воздухом большего количества CO в газах и более высокой их температуре, а также худшему выгоранию топлива. Для улучшения режима и достижения большей экономичности процесса применяют помимо дутья пара снизу вверх также дутье пара сверху вниз. Дутье пара сверху вниз не должно производиться непосредственно после воздушного дутья, так как водяной газ может образовать под решеткой в смеси с воздухом взрывчатую смесь; поэтому перед пуском пара сверху производится пуск пара снизу. По этим же причинам перед пуском воздуха в генератор подают под решетку пар.

Соотношение количества пара, подаваемого вверх и вниз, должно быть таково, чтобы более горячая зона была возможно ниже.

Продолжительность полного цикла парового и воздушного дутья колеблется в пределах 4—15 мин. Чем короче цикл, тем равномернее и лучше работа генератора; однако при слишком малой продолжительности цикла относительно много времени затрачивается на переключение клапанов и продувки и больше продуктов воздушного дутья примешивается к водяному газу и водяного газа к продуктам воздушного дутья.

5. ПОЛУЧЕНИЕ СМЕШАННОГО ГАЗА

Развивающиеся в генераторе температуры могут быть и бывают очень высокими (1200—1600°).

В нижней части генератора невыгодно иметь при получении воздушного генераторного газа низкую температуру, так как при этом замедляются реакции получения окиси углерода; но также невыгодно иметь и слишком высокие температуры, так как в этом случае газ, отводимый из генератора, имеет высокую температуру, что вызывает большие потери тепла в газопроводе и увеличение потери в окружающую среду самим генератором.

Вообще физическое тепло газа не всегда может быть использовано, и обыкновенно является целесообразным получение газа с повышенной теплотворной способностью и низкой температурой.

Важным, а иногда и превалирующим фактором, вынуждающим к понижению температуры в генераторе, являются также плавление золы и шлакообразование, препятствующие равномерному распределению воздуха и вызывающие большую потерю горючего в шлаке.

Для понижения температуры в нижних слоях генератора, служащего для получения смешанного газа, к подаваемому первичному воздуху примешивают водяной пар. Благодаря взаимодействию пара с раскаленным углеродом и получению водяного газа, которое сопровождается поглощением тепла, понижаются температуры в генераторе. При этом шлакообразование уменьшается, температура газа понижается и теплотворная способность газа возрастает.

Газ, получаемый при введении паровоздушного дутья, называется смешанным.

При этом процессе протекают одновременно реакции, имеющие место при получении и воздушного и водяного газов.

Исследования процесса газификации на паровоздушном дутье

Имеется ряд исследований получения смешанного газа, не находящихся однако в полном согласии друг с другом. Ниже приводятся данные по некоторым исследованиям.

Опыты Вендта (1905) (58), устанавливавшего термический к. п. д. газификации при воздушном и паровоздушном дутье, производились в генераторе диаметром в 1,7 *м*.

Согласно опытам Вендта, при подводе пара в количестве (примерно) до 0,65 *кг* на 1 *кг* газифицированного каменного угля с высоким содержанием летучих были получены результаты, приведенные в табл. 14. Потеря с потенциальным теплом горючего в провале не учитывалась. К. п. д. газификации был несколько выше при смешанном газе, чем при воздушном (74,80 и 71,40%). Теплосодержание воздушного газа было выше, чем смешанного (12,54 и 9,92%).

Из данных табл. 14 видно, что при добавке водяного пара (опыты, помеченные цифрой II) содержание CO_2 в газе несколько возрастает, причем восстановление ее, как и разложение водяного пара, продолжается в более высоких слоях (0,75—1 *м*). Зона сухой перегонки опускается ниже, чем в случае воздушного дутья.

Боне и Уиллер (1907) (103) производили опыты газификации английского каменного угля при различных добавках пара и подогретом дутье. Опыты проводились в генераторе диаметром в 3 *м* с неподвижной решеткой. Уголь имел состав: C — 78%, H — 5,4%, S —1%, N — 1,4%, O — 10%, A — 4,2% и летучих — 36%. В одной серии опытов высота слоя составляла 1,06 *м*, в другой — 2,13 *м*. Производительность во втором случае была вдвое меньшей.

Из данных табл. 29 видно, что при малой добавке пара (до 0,3 *кг/кг*) практически весь пар разлагается. С дальнейшим повышением подачи пара степень разложения пара понижается, несмотря на увеличение абсолютного количества разлагаемого пара. Одновременно с увеличением добавки пара растет содержание в газе H_2 и CO_2 и падает содержание CO.

Теплотворная способность газа при значительной подаче пара падает.

Опыты также показывают, что повышение слоя топлива и уменьшение скорости подачи пара увеличивают степень разложения водяного пара и термический к. п. д. При добавке водяного пара в пределах 0,2—0,6 *кг/кг* к. п. д. мало изменялся. В опытах осталось неустановленным влияние подогрева дутья.

Очень важны результаты опытов Неймана (1913 и 1914) (59), полученные при наблюдениях над опытным газогенератором. Эти данные (табл. 15) показывают на преимущественное влияние на процесс температуры раскаленного слоя и на получение в самых низших слоях топлива больших количеств CO, меньших — CO_2 и значительных — H_2. При высокой температуре зоны газификации состав газа с большим содержанием CO и H_2 устанавливается быстро. При относительно низкой температуре слоя даже при малой нагрузке и в условиях отсутствия добавки пара состав газа ухудшается и в газе наряду с CO во всех слоях имеется значительное содержани

Таблица 29

Влияние добавки пара на работу генератора

Показатель	Опыт 1						Опыт 2					
1. Средняя высота слоя топлива (в *м*)	—	—	1,06	—	—	—	—	—	2,13	—	—	—
2. Средняя производительность (в *кг/час*)	—	—	1120	—	—	—	—	—	574	—	—	—
3. Температура насыщения дутья (в °С)	45	50	55	60	70	80	60	65	70	75	80	85
4. Состав газа (в %): CO_2	2,35	2,50	4,40	5,10	9,25	13,25	5,25	6,95	9,15	11,65	13,25	14,85
CO	31,60	30,60	28,10	27,30	20,85	16,05	27,30	25,40	21,70	18,35	16,05	13,80
H_2	11,60	12,35	15,45	15,50	19,75	22,65	16,60	18,30	19,65	21,80	22,65	23,50
CH_4	3,05	3,00	3,00	3,05	3,45	3,50	3,35	3,40	3,40	3,35	3,50	3,60
N_2	51,40	51,55	49,05	49,05	46,70	44,55	47,50	45,90	46,10	44,85	44,55	44,25
5. Теплотворная способность высшая (в *кал/м³*)	1600	1590	1610	1600	1570	1526	1670	1669	1598	1549	1526	1503
6. Выход газа (в *м³/т*)	3790	3750	3760	3820	—	4065	3810	3704	3898	4012	4065	4118
7. Количество пара на 1 *кг* угля (в *кг*)	0,20	0,21	0,32	0,45	0,80	1,55	0,45	0,55	0,80	1,10	1,55	2,00
8. Степень разложения пара (в %)	100	100	100	76	—	40	87	80	61	52	40	29
9. Термический к. п. д. с учетом расхода пара на воздуходувку	0,73	0,718	0,722	0,725	—	0,665	0,778	0,750	0,727	0,701	0,665	0,625
10. Сульфата аммония на 1 *т* угля (в *кг*)	—	—	—	—	—	32,8	17,7	19,97	22,9	29,15	32,8	36,5

CO_2. Большая добавка пара сильно снижает температуру, что весьма значительно ухудшает процесс: в газе появляются большие количества CO_2 и H_2O. Разложение водяного пара и восстановление CO_2 идут и в более высоких слоях. Однако основное значение имеет состав газа, получаемого в нижних слоях топлива; процесы, протекающие в верхних слоях топлива, имеют вспомогательное значение. В большинстве случаев (см. ниже) реакция водяного газа определяет состав газа в нижних слоях. Соотношение составных частей в первую очередь зависит от начальной концентрации водяного пара в дутье: чем она меньше, тем меньше H_2O в газе. С уменьшением содержания H_2O в газе растут содержание CO и теплотворная способность газа и уменьшается содержание CO_2. По опытам Неймана, газ наилучшего состава получался при добавке пара в 0,4 *кг/кг*. С увеличением скорости дутья температуры в зоне газификации поднимаются и повышается теплотворная способность газов. Скорость дутья ограничивается разложением пара.

Эти данные также свидетельствуют об одновременном росте или падении по высоте слоя топлива содержания CO и H_2 и противоположных изменениях содержания CO_2 и H_2O.

Нейманом было доказано быстрое установление равновесия водяного газа при паровоздушном дутье в интервале температур 1000—1200° и выше, что свидетельствует о том, что реакция водяного газа имеет для процесса газификации большее значение, чем взаимодействие C с CO_2; при малой добавке пара в зоне высоких температур имеет место приближение и к равновесию Будуара.

При опытах (табл. 15) с подачей 25 *кг* пара в час значение

$$K_{опыт} = \frac{CO \cdot H_2O}{CO_2 \cdot H_2}$$

совпадало с $K_{выч}$ при 1150° и в дальнейшем с понижением температуры почти не уменьшалось. С добавкой 12,5 *кг* пара в час кривые изменения по высоте слоя $K_{опыт}$ и $K_{выч}$ сближались с увеличением скорости воздуха. При одном воздушном дутье равновесие устанавливается почти по всей высоте слоя (при достаточно высокой температуре).

Нейман наблюдал ухудшение состава газа при выходе его из слоя топлива, что являлось следствием прогара генератора у стен. С повышением скорости дутья равномерность распределения газов по сечению улучшалась.

Клемент (1923) [104] исследовал влияние различных добавок водяного пара при газификации каменного угля состава: $C_{нелет}$ — 58,8%, летучих — 34,5%, золы — 3,8%, влаги — 4,1% и серы — 0,85%. Высота слоя топлива составляла 1525 и 1070 *мм* и интенсивность газификации — 85 *кг/м² час*.

Аналогично результатам опытов Боне и Уиллера с ростом добавки пара наблюдалось увеличение содержания в газе CO_2 и H_2, уменьшение содержания CO, уменьшение степени разложения пара и увеличение абсолютного количества разлагаемого пара.

Максимальный к. п. д. газификации (отношение потенциального тепла газа к потенциальному теплу топлива) составлял при высоте слоя топлива в 1070 *мм* 67,5%, а при высоте слоя в 1525 *мм* — 70%. Он соответствовал добавке пара в 0,3—0,4 *кг* на 1 *кг* угля. При одной и той же добавке пара количество разлагаемого пара возрастало с высотой слоя, что характеризуется данными табл. 30.

Таблица 30

Разложение пара при разной высоте слоя

Добавка пара (в *кг*/*кг*)	0,25	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Разлагается пара при слое в 1525 *мм* (в %)	59,5	59	58	56,5	55	53,5	52	49	—
Разлагается пара при слое в 1070 *мм* (в %)	50	49	48	46,5	45	44	42,5	41,5	40

По исследованиям Хаслама, Энтвистля и Глединга (1925) [105], а также Мэкки и Рида (1925) [106], газификация кокса протекает следующим образом (рис. 36а).

Входящая в генератор смесь пара и воздуха проходит через слой золы, несколько нагреваясь и не меняясь в составе. При попадании смеси в зону раскаленного угля начинаются реакции горения углерода и получения генераторного газа. Кислород полностью потребляется на высоте 75—100 *мм*, и количество CO_2 возрастает соответственно реакции:

$$C + O_2 = CO_2 + 95\,407\ кал.$$

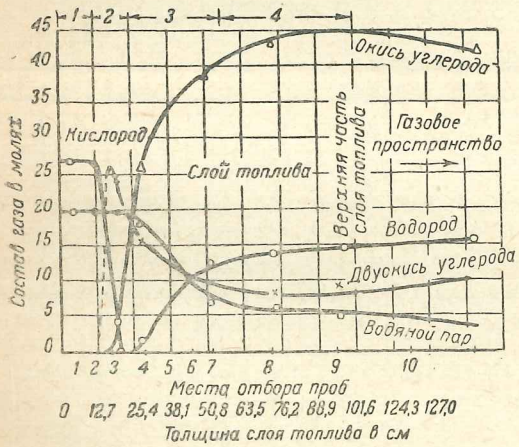


Рис. 36а. Характеристика процесса получения смешанного газа:

1 — зольная зона, *2* — окислительная зона, *3* — первичная восстановительная зона, *4* — вторичная восстановительная зона

В зоне горения выделяются большие количества тепла, и она является самой горячей зоной генератора.

В дальнейшем, по мере движения вверх, после достижения максимального содержания CO_2, количество его постепенно падает. Образования CO в сколько-нибудь значительном размере не замечается до исчезновения кислорода и до достижения максимума CO_2. По

исчезновении свободного кислорода начинает быстро образовываться окись углерода, и на протяжении 300 *мм* по высоте слоя топлива наблюдается увеличение ее содержания. Водяной пар также начинает разлагаться после исчезновения свободного кислорода, причем сначала содержание водорода быстро возрастает.

Выше зоны горения находится восстановительная зона, где происходят восстановление углекислоты в окись углерода и разложение водяного пара с образованием водорода. В этой зоне идут следующие реакции:

$$C + CO_2 = 2CO - 39\,893\ кал. \quad (B)$$
$$C + H_2O = CO + H_2 - 30\,044\ кал. \quad (4)$$
$$C + 2H_2O = CO_2 + 2H_2 - 20\,195\ кал. \quad (5)$$
$$CO + H_2O = CO_2 + H_2 + 9849\ кал. \quad (6)$$

Рассмотрение этих реакций показывает, что при увеличении количества разлагаемого пара за счет реакций (4) и (5), т. е. с увеличением отношения $\frac{H_2}{H_2O+H_2}$, должно расти содержание в газе углекислоты и окиси углерода и следовательно увеличиваться отношения $\frac{CO+CO_2}{N_2}$.

Одновременно идет увеличение отношения $\frac{CO}{CO_2}$ благодаря реакции (B), а также вследствие соответствующего соотношения протекания реакций (4) и (5).

Все три соотношения:

$$\frac{CO+CO_2}{N_2},\ \frac{CO}{CO_2}\ и\ \frac{H_2}{H_2+H_2O}$$

интенсивно возрастают на протяжении некоторого расстояния зоны восстановления. В этой части восстановительной зоны, имеющей небольшую высоту и могущей быть названной первичной восстановительной зоной, протекают реакции:

$$C + CO_2 = 2CO. \quad (B)$$
$$C + H_2O = CO + H_2. \quad (4)$$
$$C + 2H_2O = CO_2 + 2H_2. \quad (5)$$

В 12 случаях наблюдения, при которых интенсивность газификации колебалась в пределах 40—300 *кг* топлива на 1 $м^2$ решетки в час, а толщина слоя топлива менялась от 0,5 до 1,5 *м*, высота первичной восстановительной зоны не превышала 350 *мм*.

Выше первичной восстановительной зоны продолжает увеличиваться отношение $\frac{H_2}{H_2+H_2O}$ при мало изменяющемся отношении $\frac{CO+CO_2}{N_2}$, что свидетельствует о взаимодействии водяного пара с углеродом по реакции (6). Кроме того выше первичной зоны имеет место

некоторое увеличение отношения $\frac{CO}{CO_2}$ при почти неизменном отношении $\frac{CO + CO_2}{N_2}$, что является признаком протекания также реакции (В). Таким образом во вторичной восстановительной зоне протекают, но в слабой степени, реакции:

$$C + CO_2 = 2CO. \quad (В)$$

$$CO + H_2O \quad CO_2 + H_2. \quad (б)$$

По этим данным основная функция вторичной восстановительной зоны—это роль теплообменника, в котором поднимающиеся газы отдают часть тепла топливу, постепенно опускающемуся в первичную реакционную зону. Благодаря передаче тепла поднимается температура первичной зоны и увеличивается количество разлагаемого пара и восстанавливающейся углекислоты.

Приведенные данные, как и в других исследованиях Хаслама и соавторов, в отношении состава газа в нижних слоях (отсутствие значительного содержания CO) находятся в противоречии с данными других исследований и в этой части неверны, что может найти объяснение в догорании при отборе проб CO и H_2 в присутствии свободного O_2.

Хасламом, Энтвистлем и Гледингом, а также Мэкки и Ридом (1925) было произведено в опытном генераторе исследование зависимости процесса газификации антрацита, содержащего тугоплавкую золу, от скорости дутья при добавке пара в 0,4 *кг/кг* и разных высотах слоя топлива.

Опыты показали, что при постоянных высоте слоя топлива и добавке пара максимальная температура основной восстановительной зоны, степень разложения водяного пара, содержание CO и H_2 в газе и к. п. д. газификации (считая только на потенциальное тепло в газе) растут со скоростью горения.

С увеличением высоты слоя топлива при постоянной добавке пара и скорости горения также растут степень разложения водяного пара, максимальная температура, содержание CO и H_2 в газе и к. п. д. газификации.

То, что с увеличением интенсивности горения при неизменных добавке пара и толщине слоя растет разложение пара, объясняется авторами повышением температуры и меньшим значением продолжительности контакта сравнительно с температурой (в действительности связано и с увеличением подачи кислорода и скорости диффузии).

Авторы также находят, что высота зон окисления и восстановления не зависит от толщины слоя топлива и интенсивности горения и что пар в окислительной зоне не подвергается заметному разложению.

При опытах Хаслама, Варда и Мэкки (1927) [107], изучавших влияние добавки пара при газификации антрацита, было установлено, что оптимальная добавка пара составляет 0,7—0,8 *кг* на 1 *кг* угля при интенсивности газификации в 195 *кг* угля на 1 $м^2$ сечения в час; что оптимальная величина растет с интенсивностью газификации; что повидимому наилучшим является режим с большими скоростями при высоком слое, увеличивающемся с величиной добавки пара; что высота окислительной и первичной восстановительной зон постоянна и что значение $K = \frac{CO \cdot H_2O}{CO_2 \cdot H_2}$ увеличивается с добавкой пара и средняя температура первичной восстановительной зоны уменьшается с увеличением добавки пара.

Согласно исследованиям Денеко (1934) [209] работы коксового генератора диаметром 2,6 *м* при паровоздушном дутье уже на высоте в 200 *мм* от слоя шлака в газе содержится малое количество CO_2 и большое CO и H_2, т. е. процесс газификации почти заканчивается. Слоя горючего в 600 *мм* достаточно для газификации. У охлаждаемого кожуха вследствие низкой температуры получается газ с высоким содержанием CO_2, особенно при крупнозернистом топливе. Производительность генератора составляла при опытах 11—23 *т* в сутки.

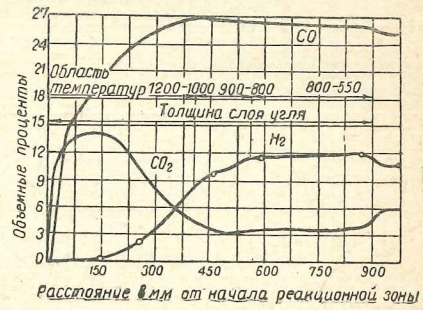


Рис. 36б. Изменение состава газа по высоте слоя топлива

По позонному исследованию состава газа, произведенному В. И. Кармазиным 1937 [210] (рис. 36б), в каменноугольном генераторе Чапмана большого диаметра (с помощью охлаждаемой водой штанги) рост содержания в газе CO и CO_2 идет одновременно, что свидетельствует о наличии в газе первичной CO. Наблюдаемое по анализам отсутствие в низших слоях свободных O_2 и H_2 позволяет предположить догорание при заборке пробы H_2 и части CO за счет свободного O_2.

Затухание реакций уже на высоте 600 *мм* свидетельствует об отсутствии необходимости в высоком слое топлива, затрудняющем обслуживание. Эти данные правильнее объясняют процесс, чем представленные на рис. 36а.

Гродзовским и Чухановым [61] в Институте азота были проведены исследования газификации на паровоздушном и обогащенном кислородом дутье. Газификация велась в кварцевых трубках, снабженных электрическим подогревом. Пробы газов брались на различных высотах слоя через отводы, охлаждавшиеся водой. Топливом служили активированный древесный уголь и газовый кокс с размерами частиц от 2 до 4 *мм*. Высота слоя составляла 300 *мм*. Количество выгоревшего топлива определялось взвешиванием. Дутье подавалось сверху вниз во избежание выноса топлива с газами. Температура печи поддерживалась при древесном угле около 500°, а при коксе — около 700°. Температура зоны газификации, имевшей небольшую высоту, составляла примерно 1000—1100°.

Состав газа устанавливался уже на расстоянии первых 10—20 *мм* (рис. 37).

В опытах с паровоздушным дутьем при содержании водяного пара в дутье, равном 13—14 объемных процентов на 1 *кг* топлива, скорость дутья (на холодное дутье и свободное сечение) доходила до 1,4 *м/сек* при активированном древесном угле.

Увеличение линейной скорости дутья не только не уменьшало процента разложения водяного пара, но даже увеличивало его. До 0,3—0,4 *м/сек* разложение H_2O возрастает до 80% и достигает при 1,4 *м/сек* 85,90%. Содержание CO_2 с 5% при скорости в 0,2 *м/сек* снижается до 2% при 1,4 *м/сек*. Содержание CO быстро увеличивается до 32% при скорости в 0,4 *м/сек* и далее — медленно; с весьма незначительным подъемом H_2 доходит до 10%; с более крутым подъемом, чем H_2, но меньшим, чем CO, степень разложения H_2O возрастает при 1,4 *м/сек* до 85%. Несмотря на превышение скоростей сравнительно с обычным, отношение $\frac{CO}{CO_2}$, быстро поднявшись при скорости около 0,25 *м/сек*, продолжает непрерывно расти, а отношение $\frac{H_2}{H_2O+H_2}$, возросшее при этой же скорости, также медленно растет. Анализ проб газа при скорости дутья в 1 *м/сек* показал, что состав газа по высоте почти не меняется. Полное расходование O_2 и падение содержания CO_2 совпадают с ростом CO и H_2. Разложение пара происходит одновременно с другими реакциями в одной зоне, имеющей малую высоту, и в чрезвычайно непродолжительное время.

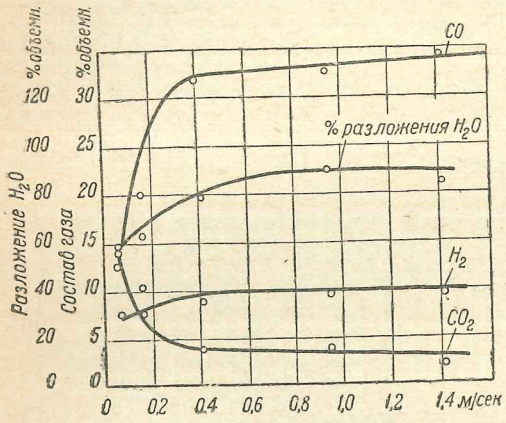


Рис. 37. Зависимость состава газа от скорости паровоздушного дутья для активированного древесного угля (ось абсцисс—скорость дутья).

При переходе на газовый кокс наблюдаются меньшее содержание в газе окиси углерода и меньшее разложение водяного пара сравнительно с наблюдениями при древесном угле. С увеличением скорости с 0,4 до 1,4 *м/сек* степень разложения водяного пара понижается с 65% при 0,4 *м/сек* до 55% при 1,4 *м/сек*, отношение $\frac{CO}{CO_2}$ резко увеличивается, и резкий подъем CO приводит к некоторому снижению содержания H_2 — с 8,0% при 0,4 *м/сек* до 6% при 1,4 *м/сек*. При продолжительности контакта (подсчитано в предположении температуры зоны газификации в 1100° и высоте ее в 10 *мм*) в 0,0004 сек. разложение пара составляет около 75% для активированного древесного угля и 55% — для кокса.

По мере увеличения содержания в дутье водяного пара степень разложения его снижается.

При активированном древесном угле с увеличением содержания водяных паров до 14% растет содержание H_2, CO_2 и O_2 и понижается степень разложения водяного пара с 100% при 2% влаги и до 80% — при 14%.

Ввиду уменьшения концентрации O_2 при введении водяного пара большое значение имеет обогащение воздуха кислородом. С увеличением содержания O_2 при том же содержании водяных паров степень разложения достигает 100% при 50% O_2.

При применении парокислородного дутья и скорости в 0,5 — 0,9 *м/сек* содержание H_2 в газе растет с влажностью дутья. При 50%-ной влажности на активированном древесном угле был получен газ состава: H_2 — 30%, CO — 65% и CO_2 — 5%. На коксе для получения аналогичных результатов требовалось более высокое содержание кислорода.

Авторы для сравнения исследовали восстановление CO_2 и H_2O древесным углем при 1100°. При скорости CO_2 в 0,1 *м/сек* получалось 26% CO и при скорости в 1 *м/сек* — около 1% CO. Аналогичные результаты дали опыты с H_2O.

Авторы выдвигают положение, что при больших скоростях дутья разложение пара в присутствии кислорода происходит в одной реакционной зоне малой высоты и со значительно большей скоростью, чем в обычных условиях, и что реакция $C+H_2O+O_2$ кинетически совершенно отлична от реакции $C+H_2O$ вследствие выноса первично образующейся CO до происходящего обычно окисления в CO_2. Интенсификация процесса благодаря наличию кислорода объясняется тем, что при взаимодействии углерода с кислородом обнажаются ненасыщенные атомы кристаллической решетки углерода, обладающие достаточной энергией для образования большого количества первичной окиси углерода и для быстрого разложения водяного пара.

Аналогично интенсифицируется и восстановление CO_2 (стр. 188).

Это должно иметь значение при газификации на любом дутье, содержащем кислород (воздушном, паровоздушном, парокислородном и т. д.).

По З. Ф. Чуханову водяной пар образует с углеродом поверхностный комплекс

$$3C + 4H_2O = C_3O_4H_8,$$

разлагающийся по реакции:

$$C_3O_4H_8 \rightarrow 2CO + CO_2 + 4H_2.$$

Малая скорость разложения комплекса определяет скорость реакции C с H_2O.

При наличии кислорода разложение комплекса протекает более интенсивно по реакции:

$$C_3O_4H_8 + C + O_2 \rightarrow 2CO + 2CO_2 + 4H_2.$$

При паровоздушном дутье и отсутствии вторичных реакций

окисления CO и H_2 расход кислорода определяется скоростью окисления С кислородом и водяным паром.

По З. Ф. Чуханову изменение концентрации кислорода в слое определяется выражением:

$$l = v_{ист} \int -\frac{dO}{K_0 + K_2 O^{1,6} + K_n' O + \frac{3}{5p} K_n O^2 + \frac{1}{p} K_2 O^{2,6}},$$

где

$$K_n' = K_n + \frac{K_0}{3p},$$

K_n — замеряемая константа скорости реакции окисления паром,
K_0 — » » скорости «реакции окисления» кислородом,
K_2 — замеряемая константа скорости «реакции горения» и
p — общее количество газов в *ммо/л*.

Полученные опытом составы газов в пределах точности опыта совпадают с расчетными.

Опыты Гродзовского и Чуханова свидетельствуют о возможности работы с большими скоростями и о значительном активирующем действии кислорода. Соображения авторов об увеличении содержания CO и H_2 вследствие недостаточного времени для их окисления при больших скоростях и о наличии такого процесса в обычных условиях газификации недостаточно убедительны. Необходимо также отметить, что повидимому недостаточное внимание было уделено авторами исследованию изменения температуры слоя.

Вейсс и Уайт (1934) исследовали реакцию взаимодействия натрия с CO, обратную исследованной Фоксом и Уайтом (стр. 76), показавшими, что обратная реакция протекает слева направо выше 800° и давление паров продуктов реакции превышает атмосферное при 1025°.

Вейсс и Уайт медленно охлаждали продукты реакции, приближаясь к условиям в генераторе. Было найдено, что исследуемая реакция быстро протекает в интервале 750—900°.

Применение этой реакции к генераторной практике изучалось в миниатюрном генераторе, состоявшем из никелевой трубки, помещенной в электрической печи. Температура в нижней части трубки составляла 1050° С и в верхней 750° С.

Na_2CO_3 разлагается в нижней части генератора, где температура высока; в верхней, более холодной части он отлагается на графите и поступает в реакционную зону.

При применении необработанного графита и сухого воздуха (при 900° С и продолжительности соприкосновения 2 сек.) выходящие газы содержали 6,8% CO. При тех же условиях для графита, пропитанного Na_2CO_3, содержание CO составляло 33,6%. Для получения такого результата достаточно 0,1% Na_2CO_3. Разложение увлажненного воздуха ускоряется подобным же образом.

При добавке пара в количестве 0,111 *кг* на 1 *кг* воздуха, времени соприкосновения 0,5—0,6 сек. и добавке 1% Na_2CO_3—

содержание CO в газе составляло (900°) 30% и количество разложенного пара — 86%. В случае необработанного графита при 1050° содержание CO составляло 28% и количество разложенного пара— 65%. Вообще говоря, действие Na_2CO_3 на реакционную способность графита эквивалентно повышению температуры на 150°.

Флир и Уайт (1936) [108] изучали процесс газификации порошкообразного кокса парокислородной смесью в присутствии Na_2CO_3 в качестве катализатора. Порошкообразный кокс, обработанный 5% Na_2CO_3, газифицировался при падении в электрически обогреваемой стальной реакционной трубке диаметром в 5 *см* и длиной в 240 *см*. Парокислородная смесь подавалась в нижнюю часть трубки с температурой 175—200°, пар предварительно перегревался до 300—400°. Нижняя часть реакционной трубки была заполнена хромовыми кирпичиками, на которые накладывались куски кокса. Получающиеся газы отводились в верхней части трубки. Опыты производились при температуре 900, 950 и 1000°. Продолжительность контакта пара и кокса колебалась от 2 до 7 сек. Концентрация O_2 в водяном паре изменялась от 0 до 46%. Оптимальное количество, компенсирующее эндотермические реакции, было определено равным 45,1%.

При принятии времени, необходимого для 50%-ного разложения пара при 900°, за единицу, скорость разложения пара при 950 и 1000° была равна соответственно 1,7 и 2,2. Следовательно температурный интервал, требуемый для удвоения разложения, равен 87,5°. Скорость разложения пара мало зависела от концентрации. Время, необходимое для 75%-ного разложения пара, при каждой из изучавшихся температур вдвое больше необходимого для 50%-ного разложения. Практически полное разложение пара было достигнуто при 1000° и продолжительности контакта в 5 сек.

Протекание реакций с паром объясняется следующим образом:

$$C + H_2O = CO + H_2 \text{ и } CO + H_2O = CO_2 + H_2.$$

Кажущаяся энергия активации при 900—1000° равна 26 800 *кал.*

Изучение механизма реакции показало, что скорость разложения пара практически не зависела от его концентрации и что механизм катализа заключался не только в поверхностном эффекте.

Опыт показал, что концентрация CO_2 в газе, вначале высокая, быстро уменьшается в течение первых секунд. Изменение концентрации CO_2 обусловливается реакциями $C + CO_2 = 2CO$ и $CO + H_2O = CO_2 + H_2$. Вторая реакция при температурах опыта приближается к равновесию. При этом концентрация CO_2 определяется разложением водяного пара. Для получения газа с низким содержанием CO_2 необходимо значительное разложение пара.

Опыт показал, что если разложение пара увеличивается с 50 до 75%, то общее разложение газов изменяется с 30 до 60% независимо от концентрации O_2 в поступающей смеси. Это примерное соотношение не зависело от температуры, продолжительности контакта и содержания O_2 во входящих газах.

Полное разложение, равное отношению объема полученного газа к исходному минус 1 (x100), характеризует образование CO и H_2.

Максимальная температура колосниковой решетки при установившемся режиме зависит от концентрации O_2 в поступающих газах, скорости поступления парокислородной смеси, температуры ее подогрева и потери тепла топкой. Температура решетки пропорциональна общей скорости дутья при входе в степени 0,16. Зависимость температуры решетки от скорости газов указывает, что экзотермические реакции углерода с кислородом повидимому идут быстрее (при более коротком контакте), чем эндотермические реакции с CO_2 и паром. Таким образом окисление O_2 при этих условиях определяется не скоростью реакции, а скоростью его диффузии через газовую пленку.

В данной работе было установлено, что с понижением скорости подачи топлива-катализатора степень разложения пара уменьшается для одинакового времени соприкосновения. Таким образом реакция $2Na+H_2O=Na_2O+H_2$ зависит от концентрации паров Na; повидимому это — цепная реакция, и наиболее медленная реакция в цепи — мономолекулярная.

Ряд исследований работы современных газогенераторов опровергает соображения о необходимости высокого раскаленного слоя для получения высокого содержания CO в газе и разложения водяного пара. При достаточно высокой температуре слоя и хорошем обтекании кусков топлива высокое содержание CO в газе и разложение H_2O достигаются очень быстро при любых скоростях дутья. Старая теория получения в низших слоях топлива CO_2 в результате окисления C (непосредственно или через CO) ставила лимит скорости дутья (и следовательно производительности), определяемый продолжительностью соприкосновения газов и топлива.

В табл. 31 приведены данные Виндетта (1934) [109], характеризующие работу американских каменноугольных газогенераторов современного типа с автоматическими шуровочными приспособлениями.

Таблица 31

Сравнительная характеристика работы старых и новых газогенераторов

Данные	Старая практика	Новая практика
	Способ обслуживания	
	ручной	механический
Высота зон (в *мм*): окисления	0—127	381—762
восстановления	762 и больше	
сухой перегонки	305	
Всего (в *мм*)	1193—2388	—
Интенсивность газификации (в *кг/м² час*)	39,06—73,10	244—527
Отношение $\frac{CO}{CO_2}$	5	5
Продолжительность соприкосновения топлива и газа (в сек.)	1,4—4,6	0,5

Таким образом, несмотря на значительное уменьшение продолжительности соприкосновения при интенсификации процесса, качество газа и к. п. д. остались на том же уровне, что и при низких производительностях и высокой раскаленной зоне. Как указывает Виндетт, увеличение скорости газов, а следовательно и кислорода, влечет за собой увеличение скорости процессов газификации и заставляет отнестись с недоверием к данным, свидетельствующим о значительном уменьшении разложения пара с уменьшением высоты. Виндетт считает, что пределы интенсификации процесса в газогенераторах далеко не достигнуты.

Данные Виндетта свидетельствуют о возможности при механическом шуровании достигнуть высоких показателей по равномерности распределения газов и обтекания топлива и о значительной активизации процесса при увеличении скорости дутья (быстрое образование CO и разложение водяного пара) также при мелком топливе. Ряд данных по работе газогенераторов в СССР в последние годы свидетельствует о возможности при достаточно равномерном распределении газов, связанном с большой однородностью размеров кусков топлива и лучшим наблюдением, весьма значительной интенсификации производительности также и при генераторах без автоматических шуровочных приспособлений (табл. 17).

Данные о результатах интенсификации работы газогенераторов при паровоздушном дутье при всех видах топлива изложены в соответствующих главах части II.

Приведенные данные исследований позволяют сделать применительно к условиям газогенератора следующие выводы.

При введении в генератор паровоздушной смеси протекают одновременно процессы получения воздушного и водяного газов и вторичные процессы, механизм которых исследован для воздушного и водяного газов. Возможно считать, что при взаимодействии паровоздушной смеси с углеродом топлива происходит одновременное образование CO, H_2 и CO_2, причем с повышением температуры получается больше CO, $H_2 \cdot CO_2$ и водяной пар по мере продвижения газов разлагаются раскаленным углеродом, а получающаяся CO взаимодействует с водяным паром. При наличии свободного кислорода CO и H_2 окисляются. Как показывают исследования, в качестве основной вторичной реакции следует принимать для газогенераторов реакцию водяного газа. Уже в самых низких слоях топлива, особенно при высокой температуре, получаются значительные количества CO и H_2 и соотношение $\frac{CO \cdot H_2O}{CO_2 \cdot H_2}$ приближается к равновесному.

Увеличение скорости газов, уменьшая толщину пленки вокруг кусков угля и увеличивая подвод O_2 к поверхности (до известной степени имеет значение и увеличение подвода CO_2 и H_2O), ускоряет процесс в целом.

Наличие и увеличение содержания в дутьевой смеси O_2 интенсифицирует разложение CO_2 и H_2O ввиду разрушения O_2 угольной решетки и увеличения количества активных центров.

При дальнейшем движении газов CO_2 и H_2O продолжают разлагаться, однако в сравнительно небольшой степени, и значение

$\frac{CO \cdot H_2O}{CO_2 \cdot H_2}$ изменяется в значительно меньшей степени, чем это должно было бы соответствовать изменению температуры.

Протеканием этой же реакции можно объяснить и причину повышения количества разлагаемого водяного пара в генераторах со швельшахтами. В последних имеется высокий слой топлива, значительная часть которого имеет низкую температуру, что способствует повидимому не столько протеканию реакции $C + 2H_2O = CO_2 + 2H_2$, идущей с затратой большего количества влаги, сколько реакции (б)

$$CO + H_2O = CO_2 + H_2.$$

Анализы газа из подобных генераторов показывают значительное содержание CO_2 наряду с большим содержанием H_2 и высокой степенью разложения водяного пара.

Расчеты к процессу получения смешанного газа

Равновесный состав смешанного газа может быть подсчитан для любой температуры и исходной газифицирующей смеси, как это изложено на стр. 41, по значениям констант равновесия и составу исходной газифицирующей смеси. Для обычного случая получения смешанного газа суммарное давление составляет 1 *am*, соотношение азота и кислорода в сухом дутье соответствует воздуху и процесс должен протекать без затраты тепла извне, т. е. должно быть удовлетворено определенное уравнение теплового баланса, что ограничивает возможные соотношения. Соответствующий подсчет для условий получения смешанного газа был выполнен Джоном А. Гоффом [110] в предположении, что топливо состоит из чистого углерода и что потери тепла в окружающую среду отсутствуют (см. ч. II) (стр. 463).

В табл. 32 приведены равновесные соотношения, удовлетворяющие указанным выше условиям.

Из приведенных данных видно, что содержание азота растет с температурой вследствие уменьшения количества водяного пара в газе; выше 900° CO_2 и H_2O практически исчезают; содержание H_2 достигает максимума при 700°, содержание CO сначала растет, но при более высокой температуре становится постоянным; при 450° водяной пар проходит, не разлагаясь; к. п. д. процесса растет с температурой до 840°, потом падает; чем выше температура, тем меньше расходуется водяного пара; при сделанных допущениях максимальный к. п. д. процесса достигается при введении 0,4 *кг* водяного пара на 1 *кг* угля.

Содержание CH_4 в равновесной смеси составляет при 800° 0,1% и уменьшается с температурой.

Соображения о ведении процесса получения смешанного газа

В зоне газификации стремятся обычно поддерживать высокие температуры для получения газа с более высокой теплотворной способностью, т. е. с большим содержанием CO и H_2, и для возможности ведения процесса с большой скоростью. Для этой цели количество вводимого водяного пара не должно превышать, как это следует из приво-

Таблица 32

Состав газа и распределение углерода

Данные	Температура (в °С)						
	450	560	615	725	840	895	1060
Состав газа (в %):							
CO	0,72	3,91	9,78	25,50	34,70	36,00	36,55
CO_2	9,37	10,45	10,84	6,58	1,73	0,82	0,09
H_2	0,42	3,96	9,08	13,20	10,60	9,47	7,29
H_2O	53,19	42,05	27,95	6,23	0,52	0,18	0,00
N_2	36,30	39,63	42,35	48,49	52,45	53,53	56,07
Q^z (*кал*/$м^3$)	33	220	530	1 110	1 314	1 332	1 291
кг H_2O на 1 *кг* воздуха	0,728	0,575	0,432	0,198	0,105	0,089	0,064
кг H_2O на 1 *кг* C	7,820	4,670	2,700	0,908	0,459	0,395	0,298
К. п. д. (химический)	7,43	35,48	59,24	79,75	83,66	83,54	81,32
Распределение C по реакциям (в %):							
(A)	94,3	72,6	54,2	39,7	37,8	38,3	40,3
(C)	2,1	13,6	22,1	20,5	14,6	12,9	9,9
(D)	3,6	13,8	23,7	39,8	47,6	48,8	49,8
	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

димых расчетов и из материалов исследований, величины в 0,4 *кг* на 1 *кг* газифицирующегося углерода, при которой разложение пара и к. п. д. являются высокими. Введение излишнего количества водяного пара имеет следствием понижение температуры зоны газификации, концентрации O_2 и количества разлагаемых CO_2 и водяного пара, ухудшение качества газа, понижение скорости газификации (уменьшение производительности генератора) и к. п. д.

Обстоятельства впрочем иногда вынуждают это делать. Например, при легкоплавкости золы приходится, чтобы не было слишком сильного шлакования, сильно понижать температуру введением пара. В этих случаях основным является бесперебойность работы генератора, но не достижение максимального к. п. д. Большая добавка пара может быть также при обслуживании генератора инжектором — прибором, в котором воздух для газификации засасывается паром. Так как инжектор плохо поддается регулировке, то на его работу может затрачиваться много пара.

Газификация при высоких температурах хорошо протекает в генераторах с выпуском жидких шлаков, где к топливу прибавляются добавки, уменьшающие температуру плавления и вязкость золы, и в нижней части генератора поддерживается такая высокая температура, чтобы шлаки находились в жидком состоянии и в таком виде могли быть удалены.

Сильно раскаленная зона обеспечивает почти полное разложение CO_2 и паров воды, и при этом состав газа быстро становится удовлетво-

рительным. При отсутствии шлакования и ведении генераторного процесса при высоких температурах раскаленной зоны и даже невысоком слое топлива содержание в газе CO_2 и неразложенных паров воды дутья можно снизить до минимума за счет получения CO и H_2.

Понижение температуры зоны газификации вызывается также отдачей тепла в окружающую среду, и поэтому добавка пара зависит от интенсивности работы генератора, так как с повышением ее увеличивается количество выделяемого в генераторе тепла, а потеря в окружающую среду остается почти неизменной. При очень тихом ходе генератора приходится уменьшать добавку пара или даже совершенно прекращать ее, чтобы избежать слишком сильного охлаждения раскаленного слоя.

Кармазиным (1937) (210) для газового угля и интенсивности газификации (A) до 350 *кг/м² час* предложено следующее выражение для температуры (t) насыщенной паровоздушной дутьевой смеси:

$$t = 39 + 0{,}04\,A.$$

В случае отсутствия или при малой добавке пара топлива с низкой температурой плавления золы могут газифицироваться при пониженной нагрузке.

Согласно более старым данным, помимо температуры слоя основное значение для работы генератора имеют высота раскаленного слоя и достаточная продолжительность обтекания топлива газами, т. е. достаточная продолжительность контакта[1]. Как это следует из данных ряда исследований, при высокой температуре раскаленного слоя хороший состав газа устанавливается очень быстро также при больших производительностях и роль большей части слоя сводится к роли теплообменного устройства, в большей или меньшей мере использующего физическое тепло газа для подогрева и подсушки топлива. С точки зрения повышения теплотворной способности газа и использования тепла в потенциальном тепле газа выгодно работать с высоким слоем и низкой температурой отходящих газов.

При низких температурах качество газа ухудшается, и более высокий раскаленный слой до известной степени способствует вследствие увеличения продолжительности контакта газов с топливом улучшению качества газа, однако обычно недостаточному. Роль высоты раскаленного слоя в этом случае более значительна.

Однако в условиях, имеющих место в газогенераторах, гораздо большее значение, чем достаточная продолжительность контакта, имеет хорошее обтекание топлива газами. При неравномерном обтекании и наличии каналов по ним устремляются пар и воздух, пар в меньшей мере разлагается, а кислород воздуха в большей мере сжигает образовавшиеся CO и H_2. В обычных условиях газификации хороший состав газа устанавливается очень быстро и газификация происходит полно также при большой производительности и слое малой высоты. Осуществленная в последние годы значительная интенсификация процесса газификации за счет улучшения распределения газов

[1] Для медленно протекающего восстановления (лимитирование производительности) основного продукта «окислительной зоны» — CO_2, получаемой в результате непосредственного окисления C или CO.

по сечению генераторов, достигнутая применением сортированного топлива и перемешивающих приспособлений и лучшим уходом, свидетельствует о возможности увеличения скорости взаимодействия углерода с кислородом и водяным паром и возможности при достаточной температуре получения высокого качества газа и хорошего разложения водяного пара при больших скоростях дутья и относительно малых высотах слоя. Известное значение имеет и высота слоя, но главным образом как фактор теплообмена и лишь частично — как фактор улучшения состава газа за счет увеличения продолжительности контакта. Увеличение содержания в дутье O_2 интенсифицирует процесс.

Соображения, приведенные в разделах о воздушном и водяном газах, об условиях, благоприятствующих газификации в отношении температур и высоты зоны, а также интенсивности газификации (скорость газового потока), применимы и к смешанному газу.

6. ГАЗИФИКАЦИЯ С ПОМОЩЬЮ КИСЛОРОДА

Водяной газ является ценным топливом, так как не содержит почти совсем баласта — негорючих составных частей и имеет высокую теплотворную способность, что определяет высокий пирометрический эффект, даваемый им, и меньшую потерю тепла с отходящими газами, получаемыми при его сжигании. Кроме того он является ценным химическим сырьем. Недостатком обычных генераторов, в которых получается водяной газ, является периодичность их работы.

Воздушный и смешанный газы получаются непрерывно, но их теплотворная способность значительно ниже, чем водяного, так как процессы получения воздушного и смешанного газов идут за счет кислорода воздуха или полностью (воздушный газ) или преимущественно (смешанный газ), а вместе с кислородом воздуха в генератор вводится азот, являющийся балластом.

Газификация топлива возможна также за счет чистого кислорода или обогащенного кислородом воздуха.

В этом случае процесс протекает с выделением тепла и может итти непрерывно с получением высококалорийного газа.

При предположении, что горение углерода в окись углерода протекает до конца за счет чистого кислорода по реакции:

$$2C + O_2 = 2CO + 55\,514\ кал,$$

газ должен состоять на 100% из CO, и теплотворная способность его в этом случае равна 3018 *кал/м³*.

При получении газа на парокислородном дутье или дутье из смеси водяного пара и обогащенного кислородом воздуха протекают те же реакции, что и при получении смешанного газа.

Объем газа, получаемого при газификации на кислородном дутье меньше, чем при воздушном дутье, что способствует увеличению температуры реакционной зоны или количества разлагаемого в ней пара и уменьшению высоты реакционной зоны и температуры выходящего из генератора газа. Газификация с помощью чистого кислорода или обогащенного кислородом воздуха с успехом протекает в генераторах

с жидким шлакоудалением в силу легкости достижения при большом содержании в дутье кислорода высоких температур. При этом могут быть также использованы шлаки и чугуны, выпускаемые из генератора.

В обычных генераторах при газификации с помощью кислорода для понижения температур обязательна значительная добавка водяного пара или углекислоты.

Высказываемые иногда соображения о больших затруднениях при использовании парокислородного дутья вследствие очень сильного шлакования неосновательны, так как может быть выбрано влагосодержание дутья, соответствующее свойствам топлива и режиму газификации и предупреждающее шлакование, так же как это имеет место при обычной газификации за счет паровоздушного дутья.

Выбор соотношения в исходной газифицирующей смеси азота, кислорода и водяного пара позволяет получить газ с широким диапазоном соотношений H_2, CO, CO_2 и N_2, что имеет особенное значение при химических синтезах.

Применение кислорода для газификации до сих пор ограничивалось его стоимостью, уменьшающейся с совершенствованием методов получения. Для добычи кислорода имеется много способов. Наиболее разработанным и рациональным в настоящее время является способ, основанный на глубоком охлаждении воздуха.

Для газификации имеет значение применение как специально добытого кислорода, так и отбросного кислорода, получающегося в некоторых производствах. Одним из преимуществ этого способа газификации является возможность перевода существующих газогенераторных установок на работу на парокислородном дутье, требующего только изменения в коммуникации и подводе дутья. Особые преимущества парокислородное дутье дает при газификации топлива с высоким содержанием летучих, так как при этом уменьшается расход кислорода на 1 *т* топлива и увеличивается производительность установки и кроме того возможна газификация при более низких температурах.

Большое значение имеет газификация за счет смеси водяного пара и кислорода или обогащенного воздуха при высоких давлениях, о чем изложено в разделе «Газификация под высоким давлением».

Исследование процесса газификации на парокислородном дутье

Как показывают исследования в случае газификации с малой добавкой пара, т. е. при высоких температурах, в получаемом газе содержится много CO; удаление шлака должно производиться в жидком виде; газ отличается от водяного повышенным содержанием CO. При работе на смеси из 78% по весу кислорода и 22% водяного пара в получаемом газе содержалось 80% CO.

В случае газификации со значительной добавкой пара и применения топлив, обладающих высокой реакционной способностью, можно вести процесс при низких температурах и с большим содержанием в газе H_2 и CO_2.

При применении буроугольного швелькокса и удовлетворительной производительности (200 *кг/м² час*) температура газификации была снижена до 700° и даже ниже. Количество вводимого водяного пара было очень значительно (температура парокислородной смеси

95°). Полученный газ имел следующий состав: CO_2—24,6%, C_mH_n—0,2%, O_2—0,2%, CO—26,1%, CH_4—1%, H_2—46,9% и N_2—1%, высшая теплотворная способность — 2347 *кал/м³*. Степень разложения пара находилась в пределах 50—60%; расход кислорода составлял 0,155 *м³* на 1 *м³* газа.

При газификации древесного угля при 750° на парокислородной смеси получался газ состава CO_2—33,4%, O_2—0,4%, CO—16%, H_2—48,1%, CH_4—1,1%, N_2—1%, высшая теплотворная способность—2000 *кал/м³*, низшая—1805 *кал/м³*, температура выходящего газа 450°. При 825° получался газ состава: CO_2—21,5%, O_2– 0,3%, CO—34%, H_2—42%, CH_4—1% и N_2—1,2%, высшая теплотворная способность—2416 *кал/м³*. Расход кислорода составил 0,16—0,18 *м³* на 1 *м³* полученного газа.

Проф. Драве при газификации буроугольных брикетов на парокислородном дутье в опытном генераторе с площадью сечения в 1 *м²* и со швельшахтой диаметром в 550 *мм*, при интенсивности газификации в 200 *кг/м² час*, ограниченной мощностью воздуходувки, получил следующие данные: температура насыщения кислорода водяным паром 89—93°, что соответствует соотношению водяного пара и кислорода, равному 3—3,4; состав газа: CO_2—13,2%, O_2—1,1%, C_mH_n—2,3%, CO—32,9%, H_2—42,8%, CH_4—1,1% и N_2—6,6%. При повышении производительности воздуходувки интенсивность газификации была повышена до 500 *кг/м² час* и ограничивалась сечением газопровода.

При газификации подмосковного угля на парокислородном дутье в генераторе диаметром в 2,6 *м* со швельшахтой были получены следующие результаты: состав угля: C—35,34%, H—2,90%, O—10,19% N—0,60%, S—2,72%, A—19,00% и W—29,25%, температура насыщенной паром парокислородной дутьевой смеси 91°, расход технического кислорода—0,156 *м³/кг*, расход пара — 0,425 *кг/кг*, состав газа: CO_2—20,7%, H_2S—2,3%, O_2—0,2%, C_mH_n—0,8%, CH_4—4,8%, CO—31%, H_2—37,4% и N_2—2,8%; низшая теплотворная способность—2432 *кал/м³*; выход газа—0,825 *м³/кг*; температура газа 77°. Производительность генератора составила 25—27 *т/сутки*.

В разделе «Генераторы с выпуском жидкого шлака» приведены данные о работе генераторов на парокислородном дутье.

Исследования показывают, что при газификации с помощью парокислородной смеси при низких температурах топлив с высокой реакционной способностью после удаления углекислоты можно получить газ, по составу пригодный для синтеза спиртов. Возможно также получить газ, сходный по составу с водяным газом, однако лишь при малых добавках пара во избежание образования больших количеств углекислоты.

Расчеты к процессу получения парокислородного газа

Черазоли [111] произвел расчет теоретического состава газа, получаемого при газификации углерода на парокислородном дутье, для различных соотношений пара и кислорода в дутье. При этом им был учтен тепловой баланс процесса в смысле постоянства температуры и отсутствия подвода тепла извне.

Результаты расчетов приведены в табл. 33.

Таблица 33

Зависимость теоретического состава газа от состава парокислородной смеси
(Расчет на 1 *кг* углерода)

Пара (в *кг/кг*)	Кислорода (в *кг/кг*)	Температура насыщения (в °С)	Температура равновесия газа (в °С)	Состав газа (в %)			Влажность газа (в *г/м*³)	Выход газа (в *м*³/*кг*)	Теплотворная способность газа (в *кал/м*³)		Процент кислорода в газе, покрываемый разложением пара	Тепло газа (в *кал*)			Потеря тепла (в %)
				CO_2	CO	H_2			низшая	высшая		физическое	Потенциальное низшее	Потенциальное высшее	
0,250	0,775	68	1900	0,009	85,74	14,25	0,4	2,17	2997	3006	16,5	1459	6502	6650	2,5
0,375	0,706	76	1350	0,26	80,08	19,66	4,1	2,32	2965	3060	24,0	1071	6866	7084	2,4
0,500	0,675	80	910	2,67	73,71	23,61	15,2	2,37	2873	2987	30,0	756	6828	7079	4,6
0,750	0,649	86	810	8,22	62,26	29,52	46,2	2,64	2677	2819	37,4	790	7065	7439	3,5
1,000	0,638	88,5	760	13,30	52,70	34,00	71,1	2,82	2501	2665	43,6	851	7050	7509	3,2

Из приведенной таблицы видно, что с увеличением добавки пара к кислороду снижается температура выходящего газа, в равновесной смеси повышается содержание CO_2, H_2 и H_2O и понижается содержание CO. Теплотворная способность газа с повышением добавки пара падает, выход газа и к. п. д. газификации растут. Также растет с добавкой пара количество кислорода, покрываемое вводимым паром за счет уменьшения потребляемого кислорода.

Если считать, что подсчитанные составы газа относятся к температуре выхода газа, то следует предположить более высокую температуру зоны газификации. Очевидно, что практическая работа возможна лишь с очень большими добавками пара.

7. ГАЗИФИКАЦИЯ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ

Увеличение давления способствует образованию газов, молекулы которых состоят из большого числа атомов, т. е. образование которых, согласно принципу Ле-Шателье, идет с уменьшением объема. Применительно к условиям генераторного процесса имеет значение увеличение с давлением содержания в газе CO_2 и CH_4. Хотя CO_2 и является балластом, однако его можно легко удалить путем промывки водой газа, находящегося под высоким давлением.

Сжимать приходится только кислород, подаваемый в небольшом количестве. В случае подачи на дальнее расстояние давление газа может быть использовано также для его транспортирования. С увеличением давления расход кислорода понижается.

Сжатие газа и уменьшение скоростей обусловливают увеличение производительности генератора и малое сопротивление слоя топлива; достигается возможность работы при более низких, чем обычно, температурах и уменьшение шлакования. Особенно пригодными для газификации под высоким давлением и при низких температурах являются топлива, обладающие высокой реакционной способностью, как-то: древесный уголь, торфяной и буроугольный кокс.

Как указывает Губман [112], при газификации на парокислородной смеси под давлением в 5—10 *ат* и очистке газа путем промывки водой под давлением от углекислоты и на 95% от сероводорода, а также при очистке путем сжижения от метана и окиси углерода получается газ, содержащий 72% H_2. Полученный газ может быть использован для целей синтеза, а окись углерода и метан могут найти самостоятельное применение. При газификации же под давлением в 20 *ат* после отмывки газа от углекислоты и сероводорода может быть получен газ, пригодный для городского снабжения, следующего состава: CO_2—2%, CH_4—22%, C_mH_n—0,4%, CO—18,4%, H_2—54,2% и N_2—3%, теплотворная способность — 4300 *кал/м*³.

В целях устранения неудобств, связанных с получением кислорода, и необходимостью загрузки и чистки генераторов, находящихся под высоким давлением, и вместе с тем сохранения преимуществ, связанных с газификацией под давлением, имеются предложения работы прерывистым процессом, как в генераторах водяного газа, с тем, чтобы воздух подавался под обычным давлением, а пар — под высоким. При этом отпадает необходимость в производстве кислорода, получает-

Таблица 34

Результаты опытов газификации под давлением на парокислородной смеси

Наименование статей	Полукокс (буроугольный)		Тощий каменный уголь (6% летучих)		Высушенный бурый уголь (Саксония)		Высушенный лигнит	
	Давление (в *ат*)							
	1		18		26		30		26	
	Сырой газ	Очищен. газ	Сырой газ	Очищен. газ	Сырой газ	Очищен. газ	Сырой газ	Очищен. газ	Сырой газ	Очищен. газ
Состав газа (в %):										
CO_2	25,5	3,0	35,0	3,0	35,2	3,0	38,2	3,0	32,1	3,0
C_mH_n	0,2	0,3	0,3	0,4	0,3	0,4	0,9	1,3	0,4	0,6
O_2	0,1	0,1	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3
CO	21,0	27,3	17,0	25,5	9,7	14,5	10,9	17,2	15,5	22,1
H_2	51,4	66,8	34,0	50,8	43,1	64,8	37,2	58,2	39,0	55,6
CH_4	1,8	2,3	13,3	19,8	11,5	17,3	12,7	19,9	12,8	18,3
Высшая теплотворная способность (в *кал/м³*)	2340	3141	2770	4271	2670	4120	3185	4990	3070	4520
Удельный вес (воздух=1)	0,647	0,384	0,810	0,461	0,738	0,375	0,829	0,436	0,756	0,421
Состав топлива (в %):										
влага	2,0	—			2,0		14,2		11,7	
зола	18,0	—			9,0		10,2		5,6	
C	72,2	—			81,8		55,7		57,9	
H	2,6	—			3,6		4,7		51,0	
O	3,8	—			2,7		14,4		18,6	
N	1,2	—			0,9		0,9		0,7	
Высшая теплотворная способность (в *кал/кг*)	6600	—			7510		5405		5825	
Низшая теплотворная способность (в *кал/кг*)	6450	—			7300		5055		5480	
Выход сырого газа (в *м³/кг*)	2,59	1,91			2,51		1,41		1,64	
Выход очищенного газа (в *м³/кг*)	1,99	1,28			1,68		0,90		1,15	
Высшая теплотворная способность газа, полученного из 1 *кг* топлива	6250	5520			6918		4490		5200	

Таблица 35

Результаты опытов газификации под давлением на парокислородной смеси

Данные	А	Б
Топливо (бурый уголь):		
размер кусков (в *мм*)	3 — 8	3 — 8
влаги (в %)	21,65	19,00
золы (в %)	6,50	12,00
смолы (в %)	10,13	12,40
высшая теплотворная способность (в *кал/кг*)	4860	4700
Давление (в *ата*)	20,9	20,8
Концентрация кислорода (в %)	72,0	73,2
Интенсивность газификации (в *кг/м² час*)	680	821

	Сырой газ	Очищенный газ [1]	Сырой газ	Очищенный газ [1]
Состав газа (в %):				
CO_2	31,47	2,00	31,10	2,00
H_2S	0,83	—	2,00	—
C_mH_n	0,55	0,80	1,00	1,50
O_2	0,10	0,15	0,10	0,15
CO	13,95	20,25	15,90	23,65
H_2	37,00	53,80	31,40	46,75
CH_4	13,80	20,00	15,40	22,95
N_2	2,30	3,00	3,10	3,00
Теплотворная способность газа [2] (в *кал/м³*)	2901	4220	3050	4550
Выход газа [3] (в *м³* на 1000 *кг*)	1380	878 [4]	1124	710 [4]
Выход смолы (в % от веса угля)	4,62		7,37	
Выход бензина (в %)	1,27		2,02	
К. п. д. газификации (включая смолу и бензин, в %)	93,2		90,9	
Расход пара (в *кг* на 1 *м³* очищенного газа)	1,11		1,06	
Расход чистого кислорода (в *м³* на 1 *м³* очищенного газа)	0,145		1,161	

[1] Рассчитано по сырому газу с остатком 2% CO_2

[2] Определено калориметром Юнкерса без бензина и H_2S.

[3] За вычетом расхода на перегрев пара.

[4] Выход газа в 4200 *кал/м³* при крекировании смолы из буроугольных брикетов — 1070 *м³* на 1000 *кг*.

ся высококалорийный газ и загрузка и чистка генераторов могут происходить при нормальных условиях.

Исследование процесса газификации под высоким давлением

Ряд исследований (см. гл. II) [113] подтверждает приведенные выше теоретические выводы в отношении получения при газификации под высоким давлением газа со значительным содержанием углекислоты и метана.

При опытах, проведенных в лабораторной установке с интенсивностью газификации до 600 *кг/м² час*, были получены результаты, приведенные в табл. 34.

В дальнейшем опыты проводились в газогенераторе с площадью сечения в 1 *м²* с механическим золоудалением (рис. 109). Результаты этих опытов приведены в табл. 35.

При опытах шлакования не наблюдалось и шуровки не требовалось. Заметного пылеобразования не было, что связано с малыми скоростями газа вследствие применения высокого давления (10—20 *ат*). Сопротивление слоя топлива при высоте его в 3 *м* было меньше 60 *мм* вод. ст.

Расчеты к процессу газификации под высоким давлением

Согласно расчетам, имевшим целью установить пригодность газа, получаемого под высоким давлением, для нужд отопления и получения метана, изменение равновесного состава газа при парокислородном дутье и различных давлениях приведено в табл. 36.

Таблица 36

Изменение состава газа и расхода кислорода в зависимости от давления при 1000°К

Статьи	Единица измерения	Давление (в *ата*)		
		1	10	20
Состав сухого газа:				
CO	Объемн. проц.	49,0	25,8	20,2
H_2	» »	37,0	30,4	25,8
CO_2	» »	11,3	27,5	31,8
CH_4	» »	2,7	16,3	22,2
Состав очищенного от CO_2 газа:				
CO	» »	55,2	35,6	29,7
H_2	» »	41,7	42,0	37,8
CH_4	» »	3,1	22,4	32,5
Высшая теплотворная способность очищенного от CO_2 газа	*кал/м³*	3255	4510	5160
Расход кислорода на 1 *м³* свободного от CO_2 газа	*м³*	0,164	0 124	0,102
Расход кислорода на 4000 *кал* в газе	»	0,202	0,110	0,080

Эти данные свидетельствуют о значительном увеличении CO_2 и CH_4 в газе с ростом давления и соответственном нии содержания CO и H_2.

Теплотворная способность очищенного от CO_2 газа растет с увеличением давления вследствие увеличения содержания CH_4.

Очень важно, что с увеличением давления значительно падает расход кислорода вследствие соответственного увеличения доли кислорода из водяного пара.

Институтом азота [114] были сделаны подсчеты, выявлявшие влияние отдельных факторов — температуры, давления, содержания кислорода, водяного пара и азота в дутье — на состав генераторного газа.

В табл. 37, 38, 39 и 40 даны результаты этих расчетов, причем через α обозначено отношение объемов азота и кислорода в воздухе или в техническом кислороде $\left(\frac{N_2}{O_2}\right)$ и через β — отношение объемов водяного пара к кислороду в парокислородной или паровоздушной смеси $\left(\frac{H_2O}{O_2}\right)$.

Эти расчеты имели целью выявить данные, характеризующие пригодность получаемых в различных условиях газов для различных нужд: как для целей отопления, так и в качестве химического сырья.

Данные расчетов указывают на следующее: с повышением температуры увеличивается содержание в газе H_2 и CO и уменьшается содержание CO_2, водяного пара и CH_4; с увеличением давления растет содержание в газе CH_4, CO_2 и водяного пара и уменьшается содержание H_2 и CO (особенно заметно при низких температурах); с увеличением содержания в дутье водяного пара возрастает содержание в газе CH_4 и водяного пара и уменьшается содержание углекислоты; с увеличением температуры и давления газа теплотворная способность получаемого газа растет, так же как и отношение $\frac{CO+H_2}{N_2}$, и с увеличением содержания в дутье кислорода увеличивается содержание в газе CO, H_2, CH_4 и CO_2; выход и теплотворная способность сухого газа растут с повышением температуры; выход газа с увеличением давления уменьшается; теплотворная способность сухого газа увеличивается с возрастанием величины β, т. е. отношения количеств пара и кислорода. При низких температурах и подводе значительного количества пара теплотворная способность газа очень значительна (при 500° и $\beta = 6$ — 4368 *кал* на 1 *м³* сухого, очищенного от CO_2 газа), при изменении давления теплотворная способность газа меняется незначительно.

Из приведенных расчетов следует, что:

1) наиболее сильное влияние на состав и теплотворную способность газа оказывает температура,

2) давление имеет существенное значение лишь при низких температурах газификации (500—900°),

3) состав исходной газифицирующей смеси оказывает [illegible] чистую [illegible] состав генераторного газа при любом давлении и те[illegible]ку в обычных [illegible] брикетов и стремлении получить газ с высокой теплотвор[illegible] ведет вести процесс газификации под высоким

[4] Вы[illegible]

Таблица 37

Изменение состава генераторного газа в зависимости от температуры и давления при $\alpha=1$ и $\beta=2$ (влажный газ)

Состав газа	Состав газа в объемных процентах								
	$t=500°$			$t=900°$			$t=1200°$		
	$P=1$ *am*	$P=10$ *am*	$P=20$ *am*	$P=1$ *am*	$P=10$ *am*	$P=20$ *am*	$P=1$ *am*	$P=10$ *am*	$P=20$ *am*
H_2	14,05	5,51	4,05	28,03	25,04	22,80	28,600	27,820	27,10
CO	4,19	1,34	0,96	55,80	46,80	41,00	57,100	57,890	56,70
CH_4	4,97	7,81	8,22	0,16	1,27	2,10	0,042	0,396	0,75
CO_2	32,70	33,85	34,10	0,91	6,43	10,00	0,0000222	0,218	0,43
N_2	22,55	24,10	24,42	14,51	16,05	17,00	14,290	14,410	14,50
H_2O	21,54	27,39	28,25	0,59	4,41	7,10	0,0000272	0,266	0,52
Σ % . . .	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Таблица 38

Изменение выхода и теплотворной способности генераторного газа в зависимости от температуры и от давления при $\alpha=1$ и $\beta=2$

Выход и теплотворная способность	Выход и теплотворная способность генераторного газа								
	$t=500°$			$t=900°$			$t=1200°$		
	$P=1$ *am*	$P=10$ *am*	$P=20$ *am*	$P=1$ *am*	$P=10$ *am*	$P=20$ *am*	$P=1$ *am*	$P=10$ *am*	$P=20$ *am*
Выход сухого газа (в $м^3$ на 1 *кг* углерода)	3,50	3,150	3,260	3,26	3,27	3,26	3,26	3,24	3,21
Выход сухого и очищенного от CO_2 газа на 1 *кг* углерода	2,02	1,68	1,62	3,24	3,05	2,91	3,26	3,23	3,20
Низшая теплотворная способность сухого газа (в *кал*/$м^3$)	1165	1172	1167	2439	2271	2163	2468	2481	2493
Низшая теплотворная способность сухого очищенного от CO_2 газа (в *кал*/$м^3$)	1999	2194	2225	2461	2437	2425	2468	2484	2502

Эти данные показывают, что добиться с помощью реакции ния CO_2 и C нии содержа

температуру газа при выходе из генератора держать по возможности низкой и

5) при высоких температурах (1100—1200°) и под высоким давлением, например 20 *am*, теоретически возможно получить газ с малым содержанием CH_4.

Работа по расчетному изучению соотношений между концентрациями реагирующих веществ в момент равновесия для реакций образования CH_4, C_2H_4, C_2H_6 из углерода и H_2 проведена Государственным институтом высоких давлений (Фрост) [115].

В табл. 41 приведены данные для равновесных концентраций CH_4 и H_2 при разных давлениях и температурах.

Данными, согласно приведенному в таблице уравнению, можно пользоваться при расчете концентраций CH_4, могущих получиться при длительном взаимодействии H_2 и графита или угля, но их нельзя использовать для подсчета концентраций, получающихся при распаде CH_4 в интервале температур 300—900°, так как выделяющийся при этом углерод является аморфным.

Различие между графитом и сажей уменьшается при повышении температуры, так как при более высоких температурах образуется более крупнокристаллическая сажа. Выше 900° данные для графита и сажи можно считать практически совпадающими, и пользоваться для распада CH_4 данными табл. 41.

Данные таблицы показывают, что добиться с помощью реакции

$$C + 2H_2 \rightleftarrows CH_4$$

освобождения от CH_4 при атмосферном давлении можно только при очень высоких температурах (1400—1500°); понижение давления до 0,1 *am* позволяет снизить до 900° температуру, соответствующую равновесной концентрации CH_4 в 0,2—0,3%. Синтез CH_4 почти полностью завершается при температурах 400—500° и давлении в 200 *am*.

Согласно данным по исследованию реакции образования C_2H_4, $2C+2H_2 \rightleftarrows C_2H_4$, при температурах ниже 1000°, даже при значительных давлениях C_2H_4 неустойчив и распадается (с образованием C, H_2 и CH_4) до тех пор, пока его концентрация не упадет до ничтожной величины. Наличие в газе C_2H_4 в количествах, превышающих равновесные, связано с медленностью его распада.

C_2H_6 при температурах выше 400° полностью диссоциирован по реакции

$$C_2H_6 \rightleftarrows 2C + 3H_2;$$

только давление H_2 выше 10 *am* может воспрепятствовать значительному распаду.

8. ГАЗИФИКАЦИЯ С ПОМОЩЬЮ УГЛЕКИСЛОТЫ

Углекислота может быть использована для получения окиси углерода в качестве высококалорийного газа или химического сырья.

При введении в генератор одной CO_2 возможно получить почти чистую CO. Процесс можно вести аналогично процессу получения водяного газа [1]. CO_2 может быть также добавлена к воздуху в обычных

[1] Авторское свидетельство М. С. Пеклера № 44543.

Изменение состава генераторного газа в зависимости от температуры и

Состав газа	Состав газа (в объемных процентах)										
	t=500°							t=900°			
	α=1				β=2			α=1			
	β=1	β=2	β=4	β=6	α=1	α=2	α=4	β=1	β=2	β=4	β=6
H_2	2,88	4,05	5,08	5,54	4,05	3,58	2,98	16,10	22,80	28,70	31,07
CO	1,00	0,96	0,92	0,89	0,96	0,85	0,72	43,10	41,00	39,40	38,65
CH_4	4,22	8,22	12,90	15,40	8,22	6,52	4,50	1,04	2,10	3,41	3,98
CO_2	37,80	34,10	31,16	29,77	34,10	27,40	19,70	11,05	10,00	9,05	8,92
N_2	32,70	24,42	16,12	12,20	24,42	39,10	56,10	23,42	17,00	11,00	8,22
H_2O	21,40	28,25	33,82	36,20	28,25	22,55	16,00	5,29	7,10	8,44	9,16
Σ %	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Таблица 39

состава исходной газифицирующей смеси при P=20 *ат* (влажный газ)

(в объемных процентах)										
			t=1200°							
β=2			α=1				β=2			
α=1	α=2	α=4	β=1	β=2	β=4	β=6	α=1	α=2	α=4	
22,80	19,90	16,25	17,74	27,10	34,20	38,07	27,10	23,80	19,20	
41,00	36,42	29,75	60,50	56,70	54,30	52,65	56,70	49,60	39,62	
2,10	1,63	1,09	0,32	0,75	1,21	1,47	0,75	0,58	0,378	
10,00	7,79	5,27	0,49	0,43	0,40	0,37	0,43	0,33	0,216	
17,00	28,76	43,95	20,59	14,50	9,25	6,77	14,50	25,29	40,326	
7,10	5,50	3,69	0,36	0,52	0,64	0,67	0,52	0,40	0,260	
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	

Изменение выхода и теплотворной способности генераторного газа в зависи

Показатели	Выходы и теплотворная способность генераторного газа						
	t=500°						
	α=1				β=2		
	β=1	β=2	β=4	β=6	α=1	α=2	α=4
Выход сухого газа на 1 *кг* углерода	3,41	3,09	2,78	2,58	3,09	4,16	6,30
Выход сухого и очищенного от CO_2 газа на 1 *кг* углерода	1,775	1,620	1,450	1,380	1,620	2,680	4,820
Низшая теплотворная способность сухого газа (в *кал*/*м*³)	592	1166	1910	2326	1166	871	576
Низшая теплотворная способность сухого и очищенного от CO_2 газа (*кал*/*м*³)	1141	2225	3612	4368	2225	1346	753

Таблица 40

мости от температуры и состава исходной газифицирующей смеси при P=20 *ат*

способность генераторного газа														
t=900°							t=1200°							
α=1				β=2			α=1				β=2			
β=1	β=2	β=4	β=6	α=1	α=2	α=4	β=1	β=2	β=4	β=6	α=1	α=2	α=4	
3,20	3,26	3,29	3,28	3,26	3,84	4,97	3,03	3,20	3,32	3,40	3,20	3,68	4,62	
2,830	2,910	2,960	2,960	2,910	3,520	4,700	3,020	3,190	3,300	3,390	3,190	3,600	4,620	
1911	2163	2432	2545	2163	1859	1468	2325	2494	2645	2720	2494	2174	1731	
2162	2423	2595	2738	2423	2023	1552	2337	2503	2655	2728	2503	2179	1732	

Таблица 41

Равновесные концентрации веществ, реагирующих по реакции $C_{графит} + 2H_2 \rightleftarrows CH_4$, вычисленные по уравнению, рассчитанному Введенским и Фростом

$$\lg K_p = \lg \frac{P_{CH_4}}{P^2_{H_2}} = -\lg K_{p1} = \frac{3348}{T} - 5{,}957 \lg T + 1{,}86 \cdot 10^{-3} T - 1{,}095 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 + 11{,}79$$

$t°$	$\lg K_p$	K_p	Состав равновесной смеси при $P=1$ (% CH_4)	$\frac{P_{CH_4}}{P_{H_2}}$ при давлении водорода (в *ат*)							
				0,1	0,5	1,0	10	50	100	200	
300	2,19	155	92,3	15,5	78	155	1550	780	15500	31000	
400	1,13	13,5	76,2	1,35	6,75	13,5	135	675	1350	2700	
450	0,67	4,68	63,3	0,468	2,34	4,68	46,8	234	468	936	
500	0,28	1,90	49,2	0,190	0,95	1,90	19,0	95	190	381	
550	—0,05	0,89	36,1	0,089	0,445	0,89	8,90	44,5	89	178	
600	—0,37	0,427	24,4	$4{,}27 \cdot 10^{-2}$	0,213	0,427	4,27	21,3	42,7	83,4	
650	—0,64	0,299	16,1	$2{,}29 \cdot 10^{-2}$	0,144	0,229	2,29	11,4	22,9	45,8	
700	—0,87	0,135	10,8	$1{,}35 \cdot 10^{-2}$	0,067	0,135	1,35	6,7	13,5	27,0	
750	—1,03	$8{,}32 \cdot 10^{-2}$	7,2	$8{,}32 \cdot 10^{-3}$	$4{,}16 \cdot 10^{-2}$	$8{,}32 \cdot 10^{-2}$	0,832	4,16	8,32	16,6	
800	—1,28	$5{,}25 \cdot 10^{-2}$	4,8	$5{,}25 \cdot 10^{-3}$	$2{,}62 \cdot 10^{-2}$	$5{,}25 \cdot 10^{-2}$	0,525	2,62	5,25	10,5	
900	—1,62	$2{,}40 \cdot 10^{-2}$	2,3	$2{,}40 \cdot 10^{-3}$	$1{,}20 \cdot 10^{-2}$	$2{,}40 \cdot 10^{-2}$	0,240	1,20	2,40	4,8	
1000	—1,90	$1{,}26 \cdot 10^{-2}$	1,23	$1{,}26 \cdot 10^{-3}$	$6{,}30 \cdot 10^{-3}$	$1{,}26 \cdot 10^{-2}$	0,126	0,63	1,26	2,52	
1100	—2,12	$7{,}59 \cdot 10^{-3}$	0,76	$7{,}59 \cdot 10^{-4}$	$3{,}74 \cdot 10^{-3}$	$7{,}59 \cdot 10^{-3}$	0,076	0,37	0,76	1,52	
1200	—2,31	$4{,}90 \cdot 10^{-3}$	0,49	$4{,}90 \cdot 10^{-4}$	$2{,}45 \cdot 10^{-3}$	$4{,}90 \cdot 10^{-3}$	0,049	0,24	0,49	0,98	
1300	—2,48	$3{,}31 \cdot 10^{-3}$	0,33	$3{,}31 \cdot 10^{-4}$	$1{,}65 \cdot 10^{-3}$	$3{,}31 \cdot 10^{-3}$	0,033	0,165	0,33	0,66	
1400	—2,61	$2{,}45 \cdot 10^{-3}$	0,24	$2{,}45 \cdot 10^{-4}$	$1{,}23 \cdot 10^{-3}$	$2{,}45 \cdot 10^{-3}$	0,024	0,122	0,24	0,48	
1500	—2,71	$1{,}95 \cdot 10^{-3}$	0,19	$1{,}95 \cdot 10^{-4}$	$9{,}75 \cdot 10^{-4}$	$1{,}95 \cdot 10^{-3}$	0,020	0,097	0,095	0,39	

условиях газификации или к кислороду или обогащенному кислородом воздуху при получении высококалорийного газа непрерывным процессом.

CO_2 реагирует с углеродом по реакции:

$$C + CO_2 = 2CO - 39\,893 \text{ } кал. \qquad (B)$$

Для введения CO_2 могут быть использованы отходящие газы печей. Они содержат значительное количество N_2, обычно близкое к содержанию его в воздухе, так как при полном сгорании топлива кислород воздуха (21 часть) полностью или частично замещается преимущественно углекислотой.

По равенствам:

$$2C + O_2 = 2CO \text{ и } C + CO_2 = 2CO$$

на 1 мол. CO_2 и O_2 получается одно и то же количество CO и поэтому, если в отходящих газах, вводимых в генератор, содержится ($CO_2 + O_2$) в количестве 21% (как O_2—в воздухе), то получаемый генераторный газ теоретически должен иметь тот же состав, что и воздушный.

Разница в процессах заключается в том, что на 1 атом углерода в случае газификации за счет кислорода получается 1 мол. CO, а в случае газификации за счет CO_2 получаются 2 мол. CO, и следовательно для получения одного и того же количества газа в случае пользования CO_2 требуется меньшее количество топлива. Затрата тепла по уравнению (B) на дополнительный моль CO составляет 39 893 *кал*, теплотворная же способность повышается на 67 650 *кал*. Поэтому экономия в топливе возможна, если к. п. д. процесса выше 39 893 : 67 650 = 0,59, что обычно имеет место при газификации.

CO_2 может быть использована как в целях поглощения тепла в генераторе, так и в случае подвода тепла извне.

Применение отходящих газов для понижения температур в генераторе сравнительно с использованием водяного пара имеет то преимущество, что не требует отдельной затраты топлива и других расходов, связанных с получением пара. Кроме того в отходящих газах содержится водяной пар, также действующий охлаждающим образом. Преимуществом добавки водяного пара является возможность увеличения теплотворной способности газа, чего нельзя достичь при добавке отходящих газов, если в них содержится N_2 в количестве, не меньшем, чем в воздухе, т. е. 79%. Улучшение состава газа возможно в случае добавки отходящих газов, содержащих меньшее количество N_2, как например в случае отходящих газов известково- и магнезитообжигательных печей, что особенно ценно при использовании также их тепла нагрева.

Зону газификации можно охлаждать также путем добавления к топливу веществ, разлагающихся при нагреве с поглощением тепла. Такой добавкой иногда является известняк $CaCO_3$, разлагающийся под действием жара с поглощением большого количества тепла и выделением восстанавливающейся с поглощением тепла CO_2. Недостатком подобного способа понижения температур в генераторе является необходимость добавления больших количеств этих материалов,

увеличение количества золы и понижение температуры плавления золы в результате примешивания к ней продуктов разложения добавок.

Исследования процесса разложения CO_2 углеродом велись многими исследователями, установившими сравнительную медленность его (см. выше).

Важно отметить, что в условиях наличия свободного кислорода восстановление CO_2 протекает с большей скоростью, что имеет большое значение для газификации.

Гродзовский и Чуханов [61] провели в описанной выше аппаратуре исследование взаимодействия смеси воздуха и CO_2 с углеродом при разных скоростях дутья. Результаты исследования представлены на рис. 38. Они свидетельствуют о значительной интенсификации восстановления CO_2 благодаря присутствию кислорода.

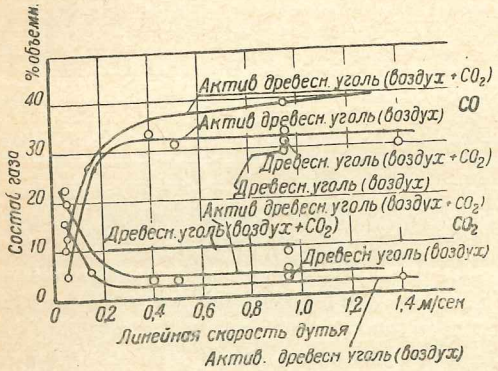


Рис. 38. Зависимость состава газа от скорости смеси воздуха и углекислоты для древесного угля

Расчеты к процессу получения регенеративного газа

Для определения примерной экономии, могущей быть полученной в результате использования отходящих газов для добавки к воздушному дутью, произведем нижеследующий расчет, отнесенный к отходящим газам, содержащим CO_2, O_2 и N_2 в соотношении:

$$\frac{CO_2 + O_2}{N_2} = \frac{21}{79} \qquad (1)$$

и не содержащим влаги.

Если пренебречь подогревом воздуха и углекислоты в слое золы, принять температуру генераторного газа равной 700°, потерю в окружающую среду—составляющей 5% от теплотворной способности топлива, количество углерода, реагирующего с отходящими газами, по реакции:

$$C + CO_2 + \frac{79}{21} N_2 = 2CO + \frac{79}{21} N_2 - 39\,893\ кал, \qquad (2)$$

равным x атомов на 1 атом углерода, реагирующего по реакции:

$$C + \frac{1}{2} O_2 + \frac{79}{2 \cdot 21} N_2 = CO + \frac{79}{2 \cdot 21} N_2 + 27\,757\ кал, \qquad (3)$$

и составить тепловой баланс генератора, то получим:

1. Реагирует и получается в весовом выражении, согласно реакции (3):

$$12\ кг\ C + 16\ кг\ O_2 + 52{,}8\ кг\ N_2 = 28\ кг\ CO + 52{,}8\ кг\ N_2 + 27\,757\ кал.$$

2. Реагирует и получается, согласно реакции (2):

$$12x\ кг\ C + 44x\ кг\ CO_2 + 28x\frac{79}{21} N_2 = 56x\ кг\ CO + 106x\ кг\ N_2 - 39\,893x\ кал.$$

3. Тепло, уносимое газами из генератора при температуре 700° и весовой теплоемкости в 0,26, равно:

$$700 \cdot 0{,}26\,(28 + 52{,}8 + 56x + 106x) = (14\,700 + 29\,500x)\ кал.$$

4. Тепло, теряемое в окружающую среду, равно:

$$95\,407\,(1 + x)\,0{,}05 = 4760 + 4760x.$$

5. Равенство количеств тепла в приходе и расходе дает:

$$27\,757 = 39\,893x + 14\,700 + 29\,500x + 4760 + 4760x;$$ откуда

$$x = 0{,}11 \text{ атома}.$$

Следовательно на каждый килограмм газифицируемого углерода может быть разложено углекислоты:

$$\frac{0{,}11 \cdot 44}{12 + 0{,}11 \cdot 12} = 0{,}363\ кг.$$

Выход газа составляет:

$$\frac{22{,}4 + \frac{79}{2 \cdot 21} \cdot 22{,}4 + 0{,}11 \cdot 2 \cdot 22{,}4 + 0{,}11 \cdot \frac{79}{21} \cdot 22{,}4}{12 + 0{,}11 \cdot 12} = 5{,}9\ м^3/кг.$$

Если бы процесс протекал только по реакции (3), то на 1 *кг* углерода мы получили бы:

$$\frac{22{,}4}{12} = 1{,}87\ м^3\ CO;$$

в данном же случае получаем:

$$\frac{22{,}4 + 0{,}11 \cdot 2 \cdot 22{,}4}{1{,}11 \cdot 12} = 2{,}05\ м^3\ CO.$$

Таким образом возможная экономия в топливе при отсутствии подогрева отходящих газов, вводимых в генератор, составляет:

$$\frac{2{,}05 - 1{,}87}{1{,}87} 100 = 10\%.$$

Теплотворная способность получаемого газа составляет в подсчитанном теоретическом случае 78% от теплотворной способности топлива.

Состав получаемого газа может быть определен следующим образом:

	CO	N_2
Получается по реакции (2)	4,9	9,3
» » » (3)	22,4	42,1
Всего	27,3	51,4

что соответствует теоретическому составу воздушного газа: 34,7% CO и 65,3% N_2.

Бо̀льшая примесь CO_2 и следовательно бо̀льшая экономия в расходе топлива возможны при использовании нагретых отходящих газов.

9. ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ГАЗИФИКАЦИИ

Процесс газификации углерода с помощью воздуха и водяного пара невозможно выразить одним химическим уравнением.

Каждому состоянию смеси газов соответствует несколько уравнений, например:

$$C + 2H_2O = CO_2 + 2H_2.$$

$$C + CO_2 = 2CO.$$

$$C + O_2 = CO_2.$$

$$CO + \frac{1}{2}O_2 = CO_2.$$

$$C + H_2O = CO + H_2.$$

$$2C + O_2 = 2CO.$$

Вместе с тем каждому определенному составу газа соответствует одна определенная комбинация уравнений.

С термохимической точки зрения безразлично, каким путем из определенных исходных веществ были получены определенные конечные вещества.

Поэтому стремятся из большого количества возможных уравнений реакций выбрать необходимые и достаточные для получения требуемых соотношений, а также охарактеризовать состав газа одним соотношением так, чтобы при сравнении газовых анализов имелась возможность дать газу определенную оценку.

Для решения этой задачи можно например выбрать три следующих уравнения:

$$C + O_2 = CO_2 + 95\,407\ кал. \qquad (A)$$

$$C + 2H_2O = CO_2 + 2H_2 - 20\,195\ кал. \qquad (5)$$

$$C + CO_2 = 2CO - 39\,893\ кал. \qquad (B)$$

Обозначая через a, b и c количество C, прореагировавшего по реакциям (A), (5) и (B), можем составить следующее уравнение:

$$(a + b + c)\cdot C + a\,O_2 + 2b\,H_2O + c\,CO_2 = (a + b)\,CO_2 + 2b\,H_2 + 2c\,CO + (95\,407\,a - 20\,195\,b - 39\,893\,c)\ кал, \qquad (а)$$

или, перенеся CO_2 в правую часть равенства, получаем:

$$(a + b + c)\,C + a\,O_2 + 2b\,H_2O = (a + b - c)\,CO_2 + 2b\,H_2 + 2c\,CO + (95\,407\,a - 20\,195\,b - 39\,893\,c)\ кал. \qquad (б)$$

Из трех переменных (a, b и c) две — независимые. Если даны две из них, то уравнение определяет третью.

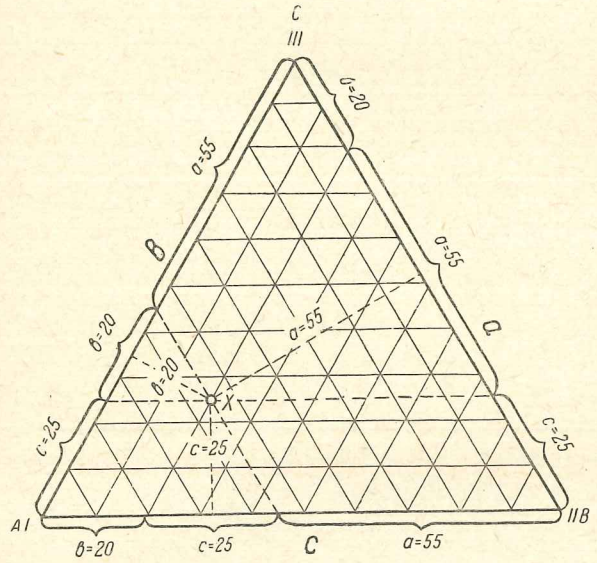


Рис. 39. Значение координат в треугольнике Гиббса

Подобное уравнение может быть представлено в треугольных осях координат (рис. 39). По предыдущему обозначаем через a, b и c количество углерода, реагирующего по уравнениям (A), (5) и (B). Каждое из уравнений связываем с углом треугольника (рис. 39). Точка x например представляет собой такой состав газа, при котором 55% C реагируют по уравнению (A), 20% — по уравнению (5) и 25% — по уравнению (B). Если мы эти значения подставим в уравнение (б), то получим для точки x следующее уравнение:

$$100C + 55O_2 + 40H_2O = 50CO_2 + 40H_2 + 50CO + 38460\ кал,$$

или с учетом азота воздуха, проходящего вместе с кислородом:

$$100C + 55O_2 + 55\frac{79}{21}N_2 + 40H_2O = 50CO_2 + 40H_2 + 50CO + 55\frac{79}{21}N_2 + 38\,460\ кал.$$

В нашем примере мы имеем процесс газификации, связанный с выделением большого количества тепла (полугаз), при котором на каждые 1200 *кг* С расходуется 5850 $м^3$ воздуха и 720 *кг* водяного пара.

Получающийся газ имеет следующий состав: CO_2 — 14,5%, H_2 — 11,5%, CO — 14,5% и N_2 — 59,5%.

Работа и состояние газогенератора лучше всего определяются газовым анализом. Анализ указывает на качество газа, и при газе недостаточно хорошего качества указывает, в чем заключается недочет режима и как его исправить и работает ли генератор достаточно экономично. Однако производство газовых анализов достаточно сложно и кроме того для того, чтобы вывести из них правильные заключения, необходимы довольно громоздкие расчеты. Поэтому очень хорошо иметь графические методы, которые дают возможность получить результаты непосредственно без расчета.

Большое значение газового анализа объясняется прежде всего простотой газовых законов. Кроме того число условий, которые влияют на газовый анализ, сравнительно не велико.

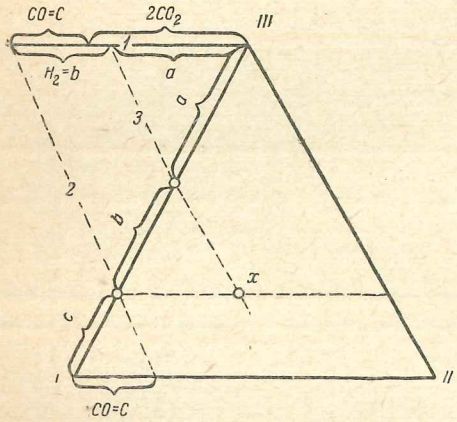


Рис. 40. Построение точки газового анализа

Одной точкой в треугольных осях координат возможно изобразить не только любое стехиометрическое уравнение газификации, но и любой состав газа [116].

В случае уравнений (B) и (5) количества *c* и *b* мы можем высчитать по образующимся количествам окиси углерода и водорода, а именно: по уравнению (B) $c = 2CO$ и $CO = \frac{c}{2}$ и по уравнению (5) $b = 2H_2$ и $H_2 = \frac{b}{2}$. Несколько сложнее с выражением углерода, реагирующего по уравнению (A), так как имеющаяся в газе углекислота составляется из количеств, выделяющихся по реакциям (A) и (5), за вычетом расхода по реакции (B). Содержание

$$CO_2 = a + b - c,$$

или

$$a = \text{содержание } CO_2 - \frac{1}{2} \text{ содержания } H_2 + \frac{1}{2} \text{ содержания CO.}$$

Указанные значения CO, H_2 и CO_2 определяют координаты. Излишне производить расчеты газа, — следует только определить такую точку, которая имеет значения по отношению к трем реакционным углам (рис. 40):

$$\left(CO_2 - \frac{H_2}{2} + \frac{CO}{2}\right);\ \frac{CO}{2} \text{ и } \frac{H_2}{2},$$

т. е. треугольные координаты:

$$a = 2CO_2 - H_2 + CO;\quad b = H_2 \text{ и } c = CO.$$

Таким образом из газового анализа, данного в процентах по объему, легко определить три координаты.

Еще проще геометрическое нахождение положения точки. Для этой цели одну из сторон треугольника (рис. 40) делят в отношении $a : b : c$ и находят искомую точку на пересечении двух прямых, проведенных через точки деления параллельно остальным двум сторонам треугольника. Для деления стороны треугольника откладывают на прямой *1*, проведенной через вершину треугольника параллельно основанию, влево отрезок, соответствующий величине $2CO_2 + CO$, и от конечной его точки вправо — H_2. На основании треугольника *I* и *II* в том же масштабе откладывают величину, соответствующую CO; полученную точку соединяют с концом отрезка $2CO_2 + CO$ (*2*) и через точку $2CO_2 + CO - H_2$ на прямой *1* проводят прямую *3*, параллельную прямой *2*. Точки пересечения прямых *3* и *2* со стороной треугольника *I—III* делят последнюю в отношении $a : b : c$.

Азот воздуха, разбавляющий газ, может быть учтен соответствующим пересчетом.

Применительно к процессу газификации более наглядное представление и более простой и лучший учет, чем с помощью треугольников, дает изображение с помощью квадратов [117].

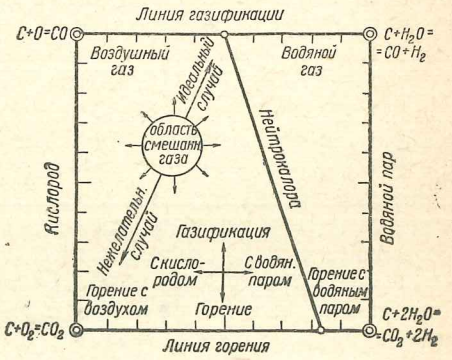


Рис. 41. Квадрат Оствальда

Если в этом случае газификацию рассматривать как неполное сгорание газифицирующегося вещества, при котором вода и воздух дают необходимый для горения кислород, то окисление углерода может протекать по реакциям:

$$C + O_2 = CO_2 + 95\,407 \text{ } кал$$

и

$$C + 2H_2O = CO_2 + 2H_2 - 20\,195 \text{ } кал$$

и с образованием CO по реакциям:

$$C + \frac{1}{2}O_2 = CO + 27\,757 \text{ } кал \text{ и } C + H_2O = CO + H_2 - 30\,044 \text{ } кал.$$

При отсутствии потерь по первым двум реакциям должен получиться газ состава: CO_2 — 31%, H_2 — 57% и N_2 — 12% и по последним: CO — 41%, H_2 — 26% и N_2 — 33%.

На рис. 41 вершины квадрата соответствуют приведенным реакциям. Верхние два угла соответствуют газификации с получением CO (воздушный и водяной газы), а нижние — горению с получением CO_2 (за счет воздуха и водяного пара). Соединение точек, соответствую-

щих двум приведенным составам газа, подсчитанным в предположении отсутствия потерь и добавки тепла извне, дает так называемую нейтрокалору, или линию полного использования тепла.

В этой области каждая точка характеризует собой определенное рабочее состояние. Так как приведенные четыре уравнения охватывают всю область процесса чистой газификации, то эта область охватывает и все мыслимые рабочие состояния чистой газификации. Каждая точка этой области показывает, до какой степени (в процентах) каждая из этих четырех реакций имела место или может быть мыслима, как имевшая место. Перемещение точки при изменениях условий реакции является таким образом надежным показателем работы.

Практически это означает, что можно обозначить самые сложные газовые анализы одной единственной точкой и что изменение состава газа отражается при изменениях рабочих условий перемещениями этой точки. Так как мы знаем точно, где лежит «идеальная точка» газификации, а именно в точке пересечения линии газификации с нейтрокалорой, то мы можем судить, происходит ли перемещение точки в благоприятном или неблагоприятном направлении. Наиболее неблагоприятной является точка горения за счет воздуха, при которой возникающий газ имеет теплотворную способность, равную нулю, и энергия горючего переходит без остатка в физическое тепло газа. Точки газификации за счет воздуха и за счет H_2O представляют собой недостаточно благоприятные крайности.

Процессы, протекающие в газогенераторе, за исключением скоропреходящих переходных состояний, при отсутствии подвода тепла извне и стационарном процессе не могут в сумме давать отрицательный тепловой эффект. Они не могут давать и нулевой эффект, так как имеются потери тепла в физическом тепле газов, выходящих из зоны газификации, и вследствие потери тепла в окружающую среду. Поэтому, а также вследствие недостаточной скорости реакций, практические газовые анализы лежат между предельными значениями, определяемыми линиями горения и газификации, а также внутри экзотермической области, отсекаемой нейтрокалорой.

Для непрерывного стационарного процесса без подвода тепла извне тот способ работы лучше, при котором точка газового анализа больше приближается к нейтрокалоре. В примененном способе изображения с помощью квадрата переменные связаны не только уравнением суммы. Этот квадрат, как видно из рис. 42, выявляет также тепловой эффект процесса для всей области, охватываемой квадратом газификации.

При применяемом способе изображения изменения между линией газификации и линией горения протекают пропорционально, и, исходя из уже полученных составов газа, мы можем получить посредством простого проведения прямых линий составы газов во всей области четырехугольника газификации (рис. 43). Это сделано для CO и H_2, т. е. для горючих компонентов генераторного газа. Линии для H_2 и CO образуют растянутую сетку прямых. Если мы будем знать только содержание H_2 и CO в генераторном газе, то мы можем найти то место в четырехугольнике газификации, которое соответствует этому составу газа.

Можно определить точку газового анализа в четырехугольнике газификации и при помощи негорючих компонентов генераторного газа, т. е. при помощи CO_2 и N_2, как это видно из рис. 44. Выбор метода зависит от возможности практического использования перемещения точек.

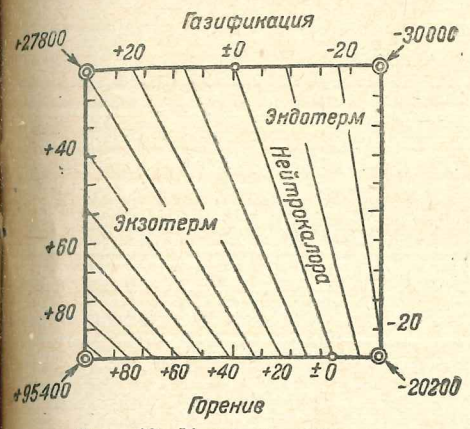


Рис. 42. Квадрат изокалор

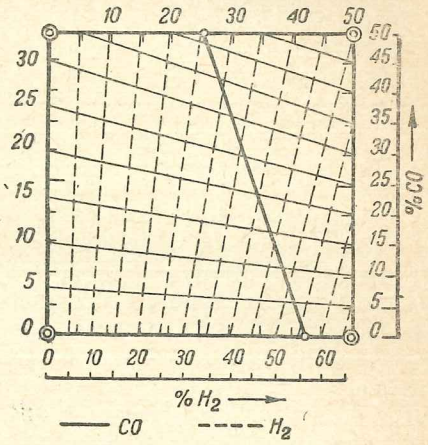


Рис. 43. Квадрат горючих газов

Возможно графически изобразить и другие свойства на четырехугольнике газификации и прежде всего теплотворную способность и количество получаемого газа.

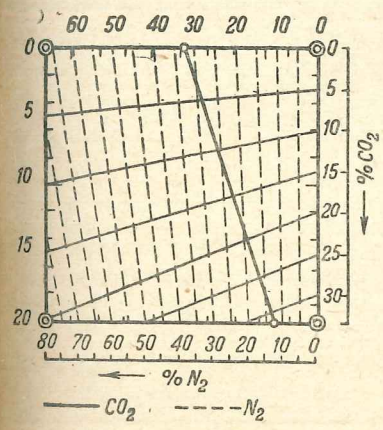


Рис. 44. Квадрат негорючих газов

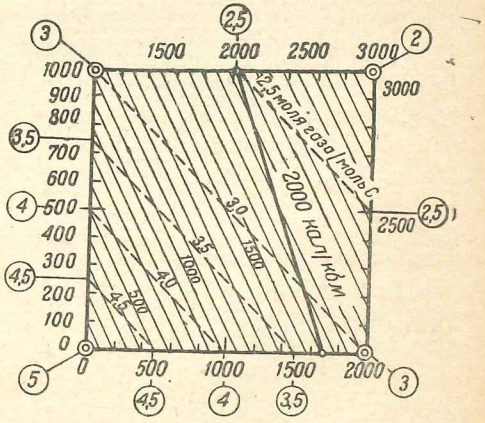


Рис. 45. Квадрат количеств и теплотворной способности газа

Рис. 45 дает обе величины, так что при перемещении точки анализа можно проследить, как перемещается наиболее экономичное теплоиспользование, которое в основном определяется выходом газа и теплотворной его способностью при изменении рабочих условий.

Таким образом по анализу двух составных частей газа возможно установить материальный и тепловой балансы процесса и экономичный способ ведения процесса.

При получении воздушного газа следует принимать меры к тому, чтобы состав газа соответствовал точкам, близким к левому верхнему углу; при H_2, равном нулю, с подъемом точки уменьшается CO_2, увеличивается CO, уменьшается выделяемое тепло, увеличивается отдача тепла топлива в потенциальном тепле и теплотворная способность газа.

При получении смешанного газа точки, соответствующие анализам, должны стремиться к идеальной точке пересечения верхней стороны квадрата с нейтрокалорой, что дает максимум содержания CO, максимальную теплотворную способность газа и отдачу тепла топлива в потенциальном тепле газов.

Точки, соответствующие воздушному и смешанному газам, должны лежать влево от нейтрокалоры, т. е. в области экзотермических процессов; в противном случае анализы неверны.

При горячем дутье в генераторах водяного газа точки состава газа должны лежать возможно ближе к нижнему левому углу, так как верхнему левому углу соответствуют в три с лишним раза меньшее тепловыделение и соответственно меньшее количество углерода, сжигаемого в период парового дутья, и получаемого водяного газа.

При паровом дутье точки должны лежать вправо от нейтрокалоры. При желании получить газ с большей теплотворной способностью следует стремиться к перемещению точек к верхнему правому углу; при желании же получить газ с высоким содержанием H_2 и CO_2 — к нижнему правому углу.

Несмотря на то, что приведенные графики построены для углерода, они могут быть использованы и для топлив с высоким содержанием летучих, так как при производственном контроле абсолютные значения имеют меньшее значение, чем относительное перемещение точек, соответствующих анализам.

Для получения более правильных абсолютных соотношений должны быть введены соответствующие коррективы.

Глава II

КЛАССИФИКАЦИЯ, УСТРОЙСТВО И РАСПОЛОЖЕНИЕ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ

Газогенераторы представляют собой сложные аппараты, которые могут быть подразделены на группы по большому количеству признаков технологического и конструктивного порядка, что затрудняет введение достаточно цельной и полной классификации. В зависимости от принятия в качестве основного того или иного признака меняется группировка по видам генераторов и возможно умаление значения одних признаков за счет излишнего выдвигания других. Очень важна правильная увязка технологических и конструктивных признаков. Ограничение одним признаком технологического или конструктивного порядка не дает достаточного разграничения типов генераторов ввиду того, что одна и та же конструкция пригодна в ряде случаев для ведения различных процессов, и наоборот, одинаковый процесс можно вести в различного типа газогенераторах. Так во всех генераторах можно вести работу непрерывным путем на разном дутье—воздушном, паровоздушном, парокислородном, а работу периодическим путем при паровом или углекислом дутье ведут в специальных конструкциях, пригодных и для непрерывной работы на воздушном, паровоздушном и тому подобном дутье. Вместе с тем технологическая характеристика и режим генератора прежде всего определяются видом получаемого газа. Он определяет в большинстве случаев и основные конструктивные особенности. Поэтому в приводимой ниже классификации (табл. 42) основным выбран признак — вид получаемого газа, а затем способ подачи дутья, направление газов и способ удаления золы. В этой классификации не учтены некоторые признаки, а именно: способ подачи топлива и шуровки слоя, расположение газогенераторов и устройство шахт, в значительной степени влияющие на конструкцию генератора.

В простейшем выполнении генераторы представляют собой кирпичную шахту, в которую топливо загружается сверху. Слой топлива лежит на колосниковой решетке или на поду генератора. Назначением колосниковой решетки является поддерживать слой топлива, распределять подводимое в нижней части генератора дутье и удалять очажные остатки — золу и шлак — или способствовать этому удалению. Иногда решетка выполняет только часть этих функций.

В зависимости от рода применяемого топлива, назначения генераторного газа и условий газификации существуют различные конструк-

Таблица 42

Классификация газогенераторов

| Признак | Выполнение | | |

ность самодувных генераторов и давление газа вверху генератора не велики. При необходимости в большой производительности генератора или значительном положительном давлении в газопроводе поддувало закрывают и подводят к нему искусственное дутье. Этим путем увеличивается производительность генераторов и вместе с тем достигается большая экономичность вследствие относительно меньшей потери в окружающую среду и меньшего лучеиспускания колосников, закрытых в этом случае.

Принудительное движение газов в генераторе может достигаться применением как искусственного дутья, так и искусственной тяги, т. е. возможно не только вдувать воздух в генератор, но и засасывать его, оттягивая из генератора газы. В этом случае генератор находится под разрежением, и при наличии неплотностей в кожухе и кладке генератора или газопроводе к газу присасывается воздух.

Это составляет одно из неудобств генератора с искусственной тягой, так как в случае присоса воздуха к газу или бесполезно сгорает часть газа или же образуется смесь газа с воздухом, способная в известных случаях дать взрыв или хлопок.

Преимущества отсасывания газа перед нагнетанием следующие: более гигиенические условия обслуживания ввиду отсутствия выделения газа, а также отсутствие необходимости в регулировании подачи дутья, поступающего в количестве, соответствующем отсосу газа, и необходимом при нагнетании воздуха.

Установка эксгаустера для отсасывания газов из генератора не практикуется при горячем и загрязненном смолой газе ввиду неудобств, создаваемых загрязнением и разогревом эксгаустера. Установка эксгаустера возможна при очистке газа. При обслуживании генератором газового двигателя газ обычно засасывается благодаря разрежению, создаваемому движением поршня двигателя.

2. ШАХТЫ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ

Форма и расположение генераторов

Шахта генераторов может быть выполнена только из кирпича или же в комбинации с железом — в железном кожухе.

При выполнении генераторов только из кирпича они делаются прямоугольной формы и могут располагаться или отдельно, или по нескольку штук в блоке. Генераторы с железными кожухами всегда располагаются отдельно. Преимуществом расположения генераторов в одном блоке является то, что они занимают мало места; при кладке экономится металл, и вследствие наличия общих стен у генераторов уменьшаются тепловые потери. Недостаток этой системы заключается в образовании трещин в промежуточных стенах генераторов от многократных расширений и сжатий при охлаждении и нагревании. Через эти трещины проникает газ из работающих шахт в соседние — порожние. При этом в случае недосмотра возможны образование взрывчатой смеси и взрыв, а также отравление персонала. Кроме того при генераторах прямоугольной формы невозможно применение круглых вращающихся решеток для механического удаления золы и шлака.

Генераторы с железными кожухами чаще всего имеют круглую форму и следовательно могут быть применены лишь для сыпучих

топлив — угля, торфа и древесной щепы. Их преимуществом являются возможность избежания неплотностей и применения вращающихся решеток для механического удаления золы.

Основание, стены и свод

Основание генератора делается или из бутового камня на цементном растворе или из бетона.

В прямоугольных генераторах без железного кожуха внешние стены выкладываются обычно в $2^1/_2$ кирпича: 1 кирпич — огнеупорный и $1^1/_2$ — красного, изредка в 1 красный кирпич. Эти шахты располагаются блоками и между шахтами кладутся промежуточные стены в 2 или $2^1/_2$ огнеупорного кирпича и больше. Иногда в стенах между шахтами засыпают слой расщебенки, чтобы расширение и сужение отдельных стен не нарушали плотности и чтобы избежать сквозных трещин и просачивания газа из одних шахт в другие. Толщина промежуточных стен при кладке в блоке зависит от их высоты и степени разъедаемости шлаком. В подобных генераторах при кладке стен красный кирпич через несколько рядов (4—5) перевязывается с огнеупорным для увеличения прочности кладки. В противном случае возможны отход и выпучивание отдельных стен.

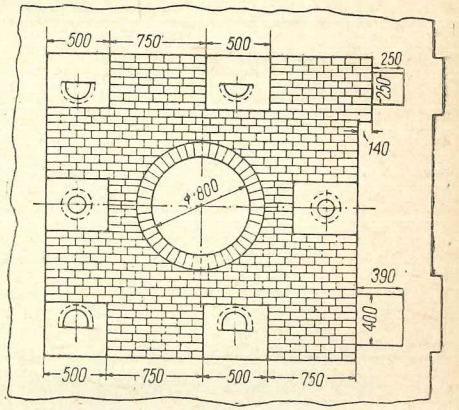


Рис. 47. Кладка генератора прямоугольной формы

Толщина свода делается равной одному кирпичу (230—250 *мм*). Свод выкладывается из огнеупорного нормального или фасонного кирпича. Поверх него кладется выстилка из красного кирпича или делается засыпка из изоляционного материала с целью уменьшить потери тепла и предохранить работающих от сильного жара.

Огнеупорный шамотный кирпич укладется на растворе из огнеупорной глины и шамотной толчи и в менее ответственных местах на растворе из огнеупорной глины и песка. Швы кладки должны быть тонкие (не более 3 *мм*). Красная кладка стен кладется на смешанном растворе (песок, известь, цемент); иногда на растворе из глины и песка.

Для установки загрузочной коробки или замыкается в своде кольцо (рис. 47) или кладка ведется внапуск, чем создается площадка для коробки (рис. 52). Иногда для уменьшения нагрузки свода на стены генератора кладутся балки или рельсы (рис. 57), передающие нагрузку на стены, иногда же свод перекрывается чугунной плитой. При кладке кирпичных одиночных шахт, а также в блоке в наружных стенках прокладывают балки или рельсы для предохранения их от выпучивания (рис. 52 и 54).

Иногда верхние части внутренних стен генераторов выкладывают из красного кирпича, руководствуясь соображениями дешевизны, но в силу малой их прочности этого делать не рекомендуется.

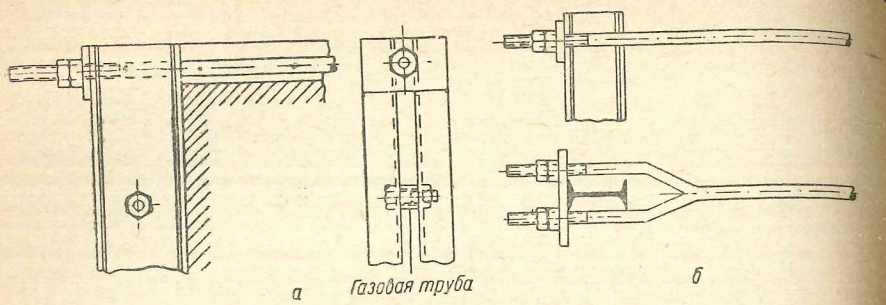


Рис. 48. Детали обвязки генераторов: *а* — обвязка швеллерами, *б* — обвязка двутавровыми балками

Прямоугольные шахты скрепляются железными стойками и связями (тяги). Стойки выполняют из рельсов, балок, швеллеров и пр. (рис. 48). Нижние части стоек заделывают в бетон, верхние части стягивают круглым железом.

Кладка кирпичных стен генераторов толста. При применении круглых шахт с железными кожухами она значительно тоньше.

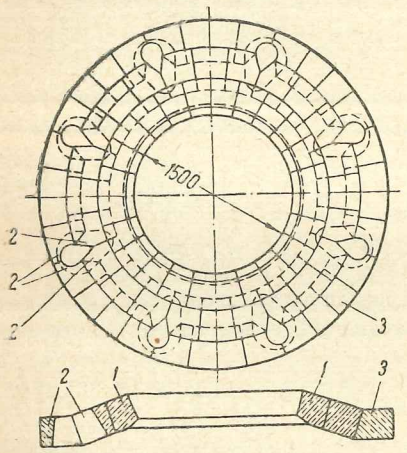


Рис. 49. Устройство свода в генераторе с питателем и мешалкой Чапмана:

1 — кирпичи для замыкания кольца, *2* — кирпичи, образующие шуровочное отверстие, *3* — пяты

Форма генераторов, снабженных железными кожухами, обычно круглая; эта форма более обеспечивает равномерное распределение кускового топлива по сечению генератора. Применение кожуха хорошо обеспечивает плотность и прочность генератора. Кладку в этом случае обычно выполняют из огнеупорных, обычно шамотных, фасонных кирпичей на шамотном растворе с тонким швом. Для лучшей изоляции генератора в смысле уменьшения потерь во внешнее пространство между огнеупорным кирпичом и кожухом помещают слой изоляции — трепел, пемзу, шлак. В местах устройства опор под свод кладка пят должна вплотную примыкать к кожуху.

Толщина огнеупорной футеровки берется обычно в пределах 200—300 *мм*; в верхней части генератора она бывает и тоньше. В швельшахте толщина футеровки обычно не превышает 80 *мм*.

Смотровые и шуровочные отверстия выполняют из фасонных кирпичей, достаточно прочных и имеющих скосы для удобства шуровки.

Над лазами делают разгрузочные своды. Газоотводной штуцер футеруют кирпичом толщиной в 65—100 *мм*.

Обычно свод выполняется из различных фасонных брусьев, особенно в тех случаях, когда он должен служить опорой для автоматического загрузочного или шуровочного приспособления. На рис. 49 представлена кладка свода под питатель и мешалку Чапмана. Своды перекрываются железными или чугунными плитами. Швельшахту обычно сводами не снабжают, а перекрывают металлическими плитами.

Иногда своды заменяют или перекрывают металлическими охлаждаемыми водой полыми крышками.

Огнеупорный материал для кладки

При выборе огнеупорного материала для генераторов следует считаться как с общими условиями газификации, так и с особенностями отдельных случаев. На стойкость футеровки оказывают влияние температурные условия, химическое действие шлака, могущего разъедать кладку или образовывать на ней наросты, механическое действие шлака и топлива (истирание) и шуровки (удары). Совокупность этих условий, а также условий кладки и сопряжения кладки с металлическими частями — кожухом, опорным металлическим кольцом и т. д. — заставляют принимать во внимание ряд свойств огнеупорных материалов: огнеупорность, состав, пористость, температуру обжига, коэфициент расширения, сопротивление в горячем состоянии под нагрузкой, помол и выкрашивание зерен, способность подвергаться теске, состояние поверхностей и т. д. К материалу, применяемому в нижней части генераторов, предъявляются высокие требования.

В условиях работы генераторов водяного газа помимо высоких температур и разъедающего воздействия шлака на кладку оказывает неблагоприятное влияние частое и резкое изменение температур, что вынуждает предъявлять соответствующие требования к материалу кладки. Повышенные требования также должны быть предъявлены в случае генераторов на парокислородном дутье ввиду возможности развития местных очагов высоких температур. В случае генераторов с выпуском жидкого шлака футеровка в области зоны газификации и горна должна иметь свойства, соответствующие требованиям, предъявляемым к доменной и ваграночной футеровке.

Огнеупорная кладка генераторов при применении постоянного сорта угля с определенным составом золы может быть по своему составу подобрана таким образом, чтобы она минимально разъедалась шлаком. К кирпичу, применяемому в верхних частях генераторных шахт и в швельшахтах, предъявляются пониженные требования.

Основным огнеупорным материалом, применяемым для футеровки, является шамот. При легкоплавком шлаке содержание Al_2O_3 в футеровочном материале не должно быть слишком низким, и последний должен быть достаточно плотным.

При работе на топливе с основным шлаком могут найти применение и специальные виды огнеупорных материалов, например тальковый камень, хромомагнезит, хромитовый кирпич и т. д.

Огенеупорная кладка обычно лежит на чугунном или железном кольце, прикрепленном к кожуху. Над нижними рядами кирпичей рекомендуется прикреплять к кожуху кольцо из углового железа, поддерживающее вышележащую кладку. В этом случае части, наиболее подверженные износу под воздействием шлака и огня, могут быть сменены без перекладки остальной огнеупорной кладки. Иногда в целях экономии материала кладку в нижней части ведут по толщине в два кирпича, сменяя при разъедании только внутреннюю часть.

В главе I уже отмечалось, что содержание окислов железа в огнеупорном материале не должно быть значительным во избежание отложения в порах кирпича углерода, выделяющегося по реакции: $2CO \rightarrow CO_2 + C$, и разрушения кирпича.

Кожух и крышка

Кожух генератора выполняется из котельного железа. Кожухи маленьких генераторов, обслуживающих двигатели, при массовом производстве делаются из чугуна. Железные кожухи свариваются или склепываются. Заклепочные швы должны быть плотные.

Кожухи выполняются из железа толщиной в 6—10 *мм* или (при охлаждающих кожухах) большей. Верхние листы обычно тоньше нижних.

К верхнему поясу крепятся угольники, на которых лежат металлические крышки генератора и площадки. Кладка генератора лежит на металлическом кольце, скрепленном с кожухом (рис. 63).

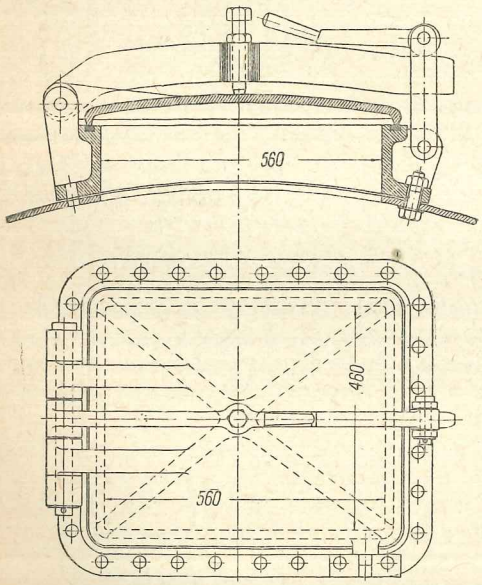


Рис. 50. Дверка генератора

К нижнему опорному кольцу прикрепляется второе кольцо (фартук), погруженное в чашу и замыкающее водяной затвор. Это второе кольцо состоит из отдельных чугунных или железных частей. На их скрепление следует обращать большое внимание, так как иногда по недосмотру зона огня опускается и кольцо раскаляется.

Фартук делают массивным или снабжают чугунной броней, что допускает раздавливание о него комьев шлака. Фартук также предохраняет кладку в нижней части от износа.

В кожухах и крышках предусматривают отверстия для шуровки и лазы. На кожухе и крышках крепят соответствующую арматуру для дверок и пробок.

На рис. 50 представлена дверка генератора. Она прижимается к раме, прикрепляемой к кожуху и снабженной для создания большей плотности в месте стыка с дверкой канавкой, заполненной асбестом. Дверка прижимается к раме с помощью упорного болта.

Генераторы с железными кожухами обыкновенно перекрываются чугунными или железными плитами, на которые ставятся загрузочные коробки.

Кожух генератора подвешивается на трех или четырех чугунных или железных колонах.

Иногда шахты выполняют вращающимися. Это вызывается соображениями лучшего шурования угля и большей интенсивности и равномерности процесса. Вращение шахты обычно имеет место в комбинации с механическими шуровочными приспособлениями (рис. 81). Крышка с шахтой соединяется в этом случае с помощью водяного затвора. К кожуху прикрепляется для приведения шахты во вращение зубчатый венец. Ролики, по которым катится опорный рельс шахты, закреплены на колоннах.

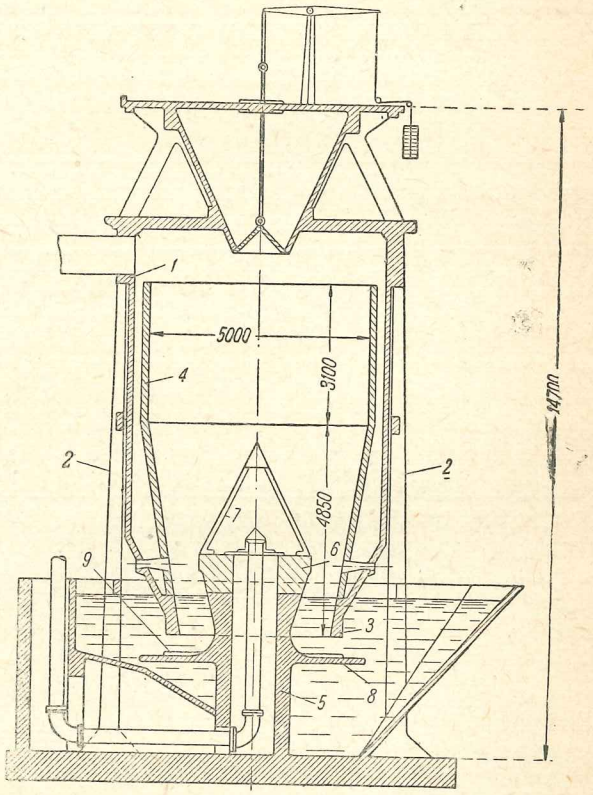


Рис. 51. Генератор с железобетонным кожухом

На рис. 51 представлен генератор с железобетонным кожухом, построенный в Италии (патент Verity). Кожух верхним кольцом *1* лежит на шести железобетонных колоннах *2*. В нижней части кожух имеет утолщение *3*, на котором лежит огнеупорная кладка *4*. Пространство между железобетонным кожухом и огнеупорной кладкой заполнено нетеплопроводным щебнем. Бетонный цилиндр *5*, в котором проходит дутьевая труба, несет огнеупорный слой *6*, решетку *7* и тарелку *8*, на которых лежит топливо. Зола с любой части тарелки *8* смывается сильной струей воды, подаваемой трубкой *9* (118).

Генератор был подвергнут разрывному и температурному испытаниям. При испытании взрывом предохранительную плиту весом в 60 *кг* отбросило на расстояние в 20 *м*; повреждений в самом генераторе не оказалось. Для температурного испытания генератор был за

полнен углем и разожжен. Через 12 час. все содержимое генератора было раскалено, и пламя выбивало наружу. Повреждений не было, несмотря на то, что температура крышки была равна 300° и кожуха — 160°, тогда как обычно температура кожуха была лишь на 20—30° выше температуры окружающего воздуха, а температура крышки составляла 60°.

По данным изобретателя, стоимость этого генератора вдвое меньше, чем железного.

О качестве работы генератора в длительной эксплоатации сведений нет.

Охлаждение стен и свода шахты

Для предохранения стен генераторов от приваривания к ним шлаков, что является результатом плавления золы, в последние годы стали применять охлаждение стен шахты.

В начальных конструкциях охлаждение устраивали поверх шамотной кладки, позднее стали целиком заменять шамотную кладку охлаждающим кожухом.

Распространению охлаждающих кожухов первоначально препятствовало их недоброкачественное выполнение, в результате которого в них оказывались неплотности. В последнее время они получают все большее распространение. В охлаждающем кожухе вода может или только подогреваться или же испаряться. Подогрев воды распространения не нашел. При подогреве температура охлаждающей поверхности изнутри низка, и на ней оседает влага паровоздушного дутья, что может вызвать ржавление; помимо этого получающийся при газификации содержащих серу топлив сернистый газ может образовать на холодной поверхности кожуха сернистую кислоту, разъедающую металл, особенно в швах.

Получение пара в охлаждающих кожухах дало гораздо лучшие результаты. Конденсации влаги на поверхностях не происходит вследствие высокой температуры поверхности кожуха. Сжатый пар, получаемый в кожухе, всегда находит себе применение. Образование накипи избегается очисткой воды. Конструкции современных кожухов допускают удобную замену частей и их чистку.

Иногда доводят охлаждающий кожух до самого верха генератора, что преследует цель использования физического тепла газа для подогрева воды или получения пара.

В виду малого сопротивления внутренних цилиндров охлаждающих кожухов давлению в кожухах в генераторах большого диаметра и при больших давлениях цилиндрические кожухи заменяют экранными трубками.

Подробнее устройство охлаждающих кожухов описано в главе IV.

Иногда взамен кирпичных сводов применяют металлические охлаждаемые водой крышки. Это может вызываться различными соображениями. При газификации антрацита и кокса получается газ высокой температуры; при очистке он охлаждается, и физическое тепло его теряется. Использовать это тепло можно при бессмольном топливе, не засоряющем металлических поверхностей, путем применения металлической крышки, в которой подогревается вода, и получения в

ней пара для увлажнения дутья, подаваемого в генератор (рис. 114, 161, 186). Кроме того охлаждение газа вверху генератора быстро выводит газ из того температурного интервала, где имеет место разложение CO с выделением углерода (сажи) по реакции:

$$2CO \rightarrow CO_2 + C,$$

и таким образом препятствует ухудшению качества газа. Применение металлических охлаждающих крышек для генераторов иногда диктуется также конструктивными соображениями, а именно необходимостью установки питательных и шуровочных приспособлений, разъединения от шахты для возможности вращения последней, а также необходимостью улучшения условий обслуживания.

Затворы шахт

При устройстве генераторов с дутьем должна быть исключена возможность утечки подаваемого вентилятором воздуха. Для этой цели необходимо разобщить нижнюю часть генератора от внешней атмосферы. Это разобщение может быть произведено при помощи водяного затвора и сухим путем.

На рис. 54 представлено устройство водяного затвора в генераторе Сименса. Оно состоит из залитого водой бетонного поддувала, в которое погружена прикрепленная к металлическому фронту балка, выключающая генератор.

На рис. 59, соответственно форме генератора Моргана, водяной затвор — круглый. В бетонное залитое водой углубление спускается прикрепленное к кожуху железное кольцо-фартук, замыкающее затвор. На рис. 60 в генераторе с вращающейся решеткой водой заливается вращающаяся чаша, в которую спущено такое же кольцо.

Описанные водяные затворы не только служат для отделения генератора от атмосферы; они дают также возможность без перерыва в процессе газификации производить очистку генератора. Удаление золы и шлака в этом случае производится выгребанием их через водяной затвор. Лишь при сильном зашлаковании генератора приходится останавливть дутье и открывать дверки для ломки шлаков.

Не всегда однако возможно и целесообразно устраивать водяной затвор вследствие того, что зола иногда является сильно гигроскопичной, впитывающей в себя воду, охлаждающую зону газификации, и тем препятствующей нормальному газообразованию; иногда же зола обладает свойством в смеси с водой затвердевать в цементообразную массу. Сухое уплотнение генераторов без вращающихся решеток представлено на рис. 55 и 58. Оно осуществлено фронтовой чугунной доской, снабженной дверками и прижатой к стене генератора.

Более совершенное устройство генераторов с сухим золоудалением и вращающейся решеткой представлено на рис. 97. В нем чаша заменена поддоном.

В генераторах с вращающимися решетками следует также предусматривать уплотнение места соединения трубы, подающей воздух, и подколосникового пространства. Это достигается или гидравлическим затвором или сальниковым с асбесто-графитовой набивкой.

На рис. 60 показано устройство гидравлического затвора решетки с секционным подводом дутья — отдельно к середине и отдельно к периферии (система Керпели). В этом случае приходится делать два гидравлических затвора. Материалом для них во избежание сильного ржавления обычно служит чугун. Следует наблюдать за постоянным наличием воды в этих затворах, что достигается путем установки подающей и контрольной сливной трубок, через которые постоянно течет вода. При хлопках воду из затвора выплескивает, но убыль быстро пополняется.

На рис. 81 и 88 показано сухое уплотнение путем сальникового устройства.

Гидравлические и сальниковые уплотнения применяются и в других местах: питателях для угля, отводных рукавах для газа, соединениях вращающихся шахт с крышками (рис. 81) и т. д.

3. КОЛОСНИКОВЫЕ РЕШЕТКИ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ

Колосниковая решетка является одной из главных составных частей газогенератора.

От устройства ее зависят расположение слоя топлива, равномерность распределения дутья по сечению генератора, способ и равномерность удаления очажных остатков и следовательно режим процесса газификации.

По конструкции приспособлений для распределения дутья, поддержания слоя топлива и удаления очажных остатков можно генераторы разделить на следующие группы:

а) генераторы с газификацией на поду,

б) генераторы с неподвижной решеткой;

в) генераторы с механической (обычно вращающейся) решеткой.

В генераторах с неподвижными решетками удаление шлака и золы производится вручную, в генераторах с вращающимися решетками — механически.

Генераторы с газификацией на поду

Генераторы с газификацией на поду — бесколосниковые, т. е. они не имеют специального колосникового приспособления для поддержания слоя топлива и распределения дутья. В них топливо лежит на поду, а дутье вводится с боковых сторон генератора. Устройство их вызывалось разными соображениями: или экономии на сравнительно дорого стоящей колосниковой решетке, или устранения провала частиц топлива через прозоры колосников, или создания специальных устройств для более совершенного распределения дутья, или же получения шлаков в жидком виде.

Иногда в генераторах с горизонтальной решеткой последнюю убирают и газифицируют топливо на поду с целью повысить слой топлива или вследствие затягивания горизонтальных колосников шлаком. Ввиду неравномерности распределения дутья по сечению эти генераторы могут применяться только для топлив крупнокусковых и газифицирующихся при высоком слое (дрова, торф), при котором распределение дутья по сечению генератора несколько выравнивается.

Так как такие топлива, как дрова и торф, у стенок лежат рыхло или образуют пазуху и воздух проходит здесь в большом количестве, сжигая газ, то шахту в нижней части суживают.

За границей Геллером были введены генераторы с газификацией на поду и с дутьем. Дутье в них подводится из боковых коробок. Внизу генератора делается водяной затвор для ручного удаления золы без остановки генератора. Шахта имеет сильно суженную книзу форму.

По мысли автора [119], в этой конструкции благодаря сосредоточению процесса газификации в небольшой части генератора и соответствующей регулировке добавки пара исключается шлакование, и газификация идет равномерно. Эти генераторы не получили особого распространения в силу малой производительности и отсутствия особых преимуществ.

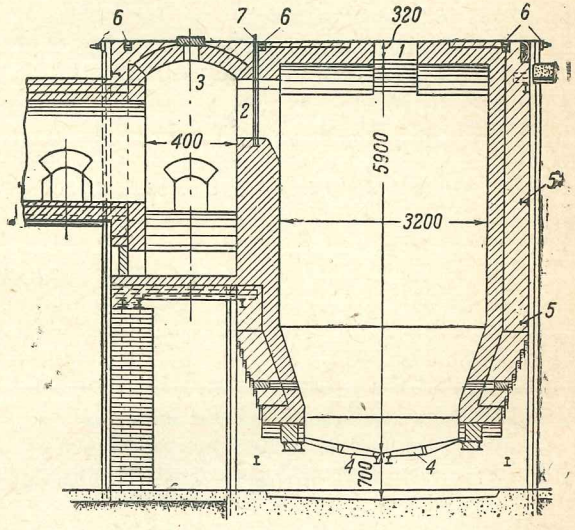


Рис. 52. Самодувный генератор с горизонтальной решеткой:

1 — прямоугольное загрузочное отверстие, *2* — газоотводное отверстие, *3* — коллектор, *4* — горизонтальный колосник, *5* — балки обвязки *6* — связи, *7* — шибер

Генераторы с газификацией на поду, обычно прямоугольные, не имеют металлических кожухов и часто выполняются по нескольку штук в общем блоке.

Чистка описанной группы генераторов происходит вручную.

Генераторы с неподвижной решеткой

В зависимости от рода топлива, формы генератора и условий газификации применяют разнообразные колосниковые решетки. Генераторы с наиболее распространенными формами неподвижных решеток можно разделить на следующие группы:

1) генераторы с горизонтальной решеткой,

2) генераторы со ступенчатой и наклонной решеткой,

3) генераторы с крышеобразной решеткой,

4) генераторы с круглой решеткой.

1. Генераторы с горизонтальной решеткой. Генераторы с горизонтальной решеткой применяются преимущественно для газификации молодых, малозольных, крупнокусковых топлив, газифицирующихся при высоком слое, а именно для дров и торфа. На рис. 52 представлен такой генератор. Обычно эти генераторы работают с естественной тягой; изредка к ним приспосабливают дутье. Значи-

тельная высота шахты и крупность кусков топлива обеспечивают хороший напор газа. Форма шахты — прямоугольная. Высоту соответственно роду газифицируемого топлива (влажное, неспекающееся — дрова, торф) делают возможно большую. Колосники применяются чугунные. Если шлакования нет, колосники прочищаются снизу от руки ломом с загнутым заостренным концом; при этом мелкая зола просыпается через прозоры. В случае шлакования комья шлака разбиваются над колосниками и сталкиваются с них.

В отдельных случаях генераторы с горизонтальной решеткой применяют и для газификации шлакующихся топлив. При этом для чистки от шлака, являющейся тяжелой операцией, приходится на значительный промежуток времени выключать генератор; иногда для удобства чистки используются вспомогательные колосники, вдвигаемые в слой топлива над решеткой.

Обычно горизонтальные чугунные колосники имеют у краев и в середине уширения, которыми примыкают друг к другу, создавая прозоры, необходимые для прохода воздуха и удаления золы. Чем больше прозоры, тем больше воздуха может пройти через них и тем лучше охлаждаются колосники. Отношение площади прозоров к общей площади решетки называется ее живым сечением. Ширина прозоров должна быть не слишком большой во избежание значительного провала частичек угля.

В средней части высота колосников иногда делается увеличенной.

Колосники уширенными концами кладут на опорные балки, причем эти балки помещают не вплотную к стене, а оставляют промежуток, чтобы иметь возможность при чистке столкнуть кусок шлака вниз через этот промежуток. Впереди колосников кладут балки, на которые при чистке опирают лом.

Длину колосников для удобства чистки обычно делают не более 1400 *мм*. При необходимости в большой площади решетки ее делают сдвоенной (рис. 52) и обслуживают с обеих сторон.

Иногда на заводах, имеющих свое гончарное производство, применяют в целях экономии металла шамотные колосники.

Применение шамотных колосников возможно лишь при малозольных и нешлакующихся топливах, не требующих значительной шуровки.

При газификации топлива с легкоплавкой золой горизонтальным колосникам иногда придают овальную форму. Колосники закладывают концами в чугунные рамы (рис. 53) и снабжают с одной стороны квадратными концами для ключа. Для взламывания шлака колосники поворачивают. В обычном положении длинные оси сечения колосников расположены горизонтально. Особых преимуществ эти колосники не имеют.

2. Генераторы со ступенчатой и наклонной решеткой. Газогенераторы со ступенчатой (рис. 54) и наклонной (рис. 55) решеткой известны под названием генераторов Сименса.

Уклон решетки дает возможность легче сдвигать топливо по мере его выгорания. Иногда уклон решетки делают больше угла естественного откоса топлива для самостоятельного сползания топлива по мере его выгорания и поддержания постоянной высоты слоя топлива.

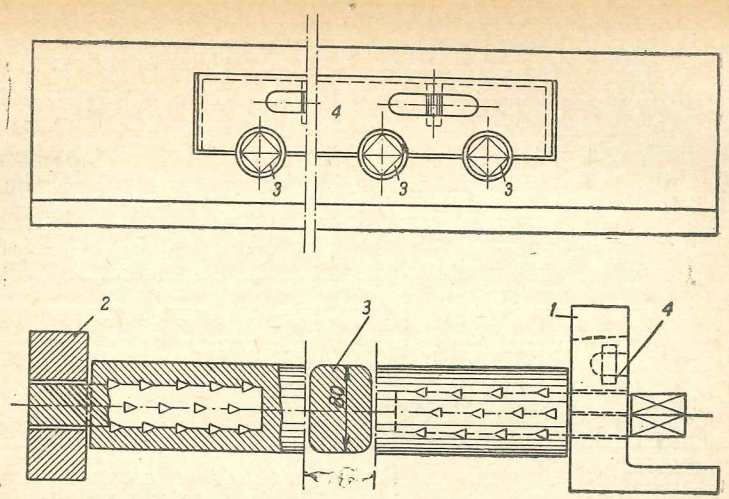


Рис. 53. Горизонтальные поворачивающиеся колосники:
1, *2*, — балочки, *3* — колосники, *4* — вкладыш

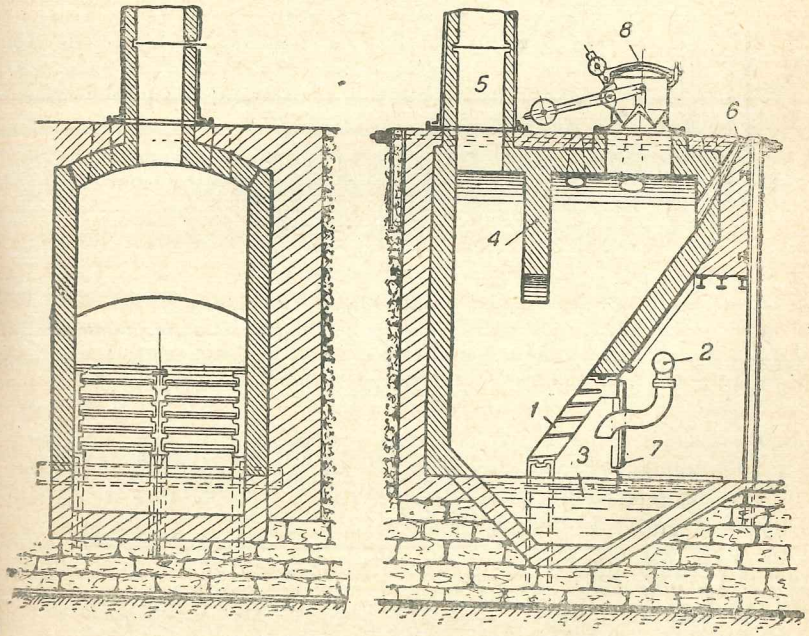


Рис. 54. Генератор со ступенчатой решеткой:
1 — решетка, состоящая из опор — тетив и ступеней, *2* — воздухопровод, *3* — гидравлический затвор, *4* — перегородка, *5* — отвод газа, *6* — шуровочное отверстие, *7* — дверка, *8* — загрузочная коробка

Однако это вызывает резкие сбросы после значительного выгорания угля ввиду недостаточной подвижности топлива. Поэтому располагают решетки также под углом, меньшим угла, соответствующего естественному откосу.

Уклон колосников увеличивает поверхность решетки сравнительно с горизонтальной, а следовательно увеличивает и количество подводимого воздуха и производительность генераторов.

Ступенчатые колосники дают возможность применять мелкое топливо, дающее большой провал при других колосниках. Эти решетки

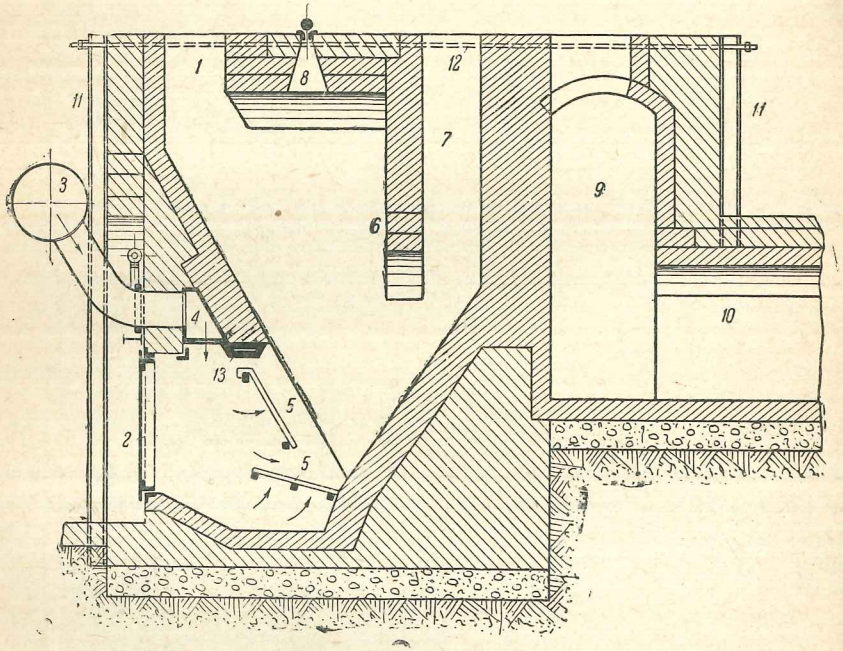


Рис. 55. Генератор с наклонными колосниками:

1 — загрузочное отверстие, *2* — дверка, *3* — воздухопровод, *4* — дутьевая коробка, *5* — наклонные колосники, *6* — перегородка, *7* — отвод газа, *8* — шуровочное отверстие, *9* — коллектор газа, *10* — газопровод из коллектора, *11* — балки обвязки, *12* — связь обвязки, *13* — чугунная плита, служащая опорой для стенки генератора

имеют большое живое сечение и хорошо охлаждаются воздухом, т. е. имеют наиболее благоприятную для прохода воздуха форму. Крупный шлак легко удаляется из-под колосников.

При круглой форме шахты ступенчатые решетки делают кольцевыми (ч. II, рис. 8).

Наклонные колосники применяются редко, так как они обусловливают значительный провал топлива.

Часто ступенчатые колосники применяются в комбинации с горизонтальными или слабо наклонными колосниками (рис. 56), что значительно увеличивает поверхность колосниковой решетки. При комбинированной решетке горизонтальные колосники располагаются таким образом, чтобы они были покрыты достаточным слоем топлива

и чтобы была удобна их чистка. Для этого же за горизонтальной решеткой, между кладкой и решеткой и между горизонтальной и наклонными решетками оставляются просветы в 10—15 *см*, чтобы иметь возможность производить чистку всей поверхности решетки во избежание заглушения части ее.

Часто эти генераторы работают самодувно, т. е. с естественной тягой и открытым поддувалом. При этом иногда пламя выбивает из промежутков между верхними колосниками, что вызывается повышением давления газа по высоте генератора. Особенно сильно это сказывается при слабой нагрузке генератора. Чтобы избежать выбивания пламени рекомендуется верхние ступени колосников замазывать глиной или мокрым песком.

Применение дутья значительно увеличивает производительность этих генераторов.

Толщина слоя топлива в генераторе устанавливается соответственно положению вертикальной перегородки (рис. 54 — 56), ограничивающей максимально возможную высоту слоя. При изменении рода топлива и необходимости изменения высоты слоя должна переделываться и эта перегородка. Она же препятствует выделению из генератора газов при загрузке топлива. При применении непостоянного сорта топлива, часто меняющегося, и следовательно необходимости частого изменения высоты слоя топлива лучше обходиться без перегородки.

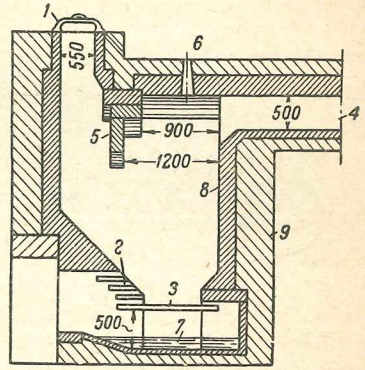


Рис. 56. Генератор со ступенчатой и горизонтальной решетками:

1 — загрузочное отверстие, *2* — ступенчатая решетка, *3* — горизонтальная решетка, *4* — газопровод, *5* — перегородка, *6* — шуровочное отверстие, *7* — залитый водою зольник, *8* — огнеупорная кладка, *9* — красная кладка

Поддувало под колосниками может быть бетонировано и наполнено водой; испаряющаяся влага охлаждает колосники, и водяной пар разлагается и обогащает газ. Кроме того частицы угля, падающие с колосников в воду, гаснут и не сгорают бесполезно.

Рекомендуется впереди решетки повесить железный лист, уменьшающий лучеиспускание и защищающий от жара газовщика при чистке и шуровке.

Ступенчатые решетки устраивают обычно из горизонтальных плитчатых колосников, которые кладут на тетивы — стойки с приливами.

Колосники делают толщиной в 20—25 *мм* и шириной в 250 — 350 *мм*. Расстояние между ступенями принимают равным 100 — 200 *мм*, так как при меньших промежутках колосники от жара прогибаются. Благодаря большой ширине ступеней и большим промежуткам между ними решетка хорошо охлаждается воздухом. Ступени должны лежать на тетивах таким образом, чтобы их было легко вынуть во время работы.

Наклонные колосники применяются обычно в виде брусков (квадратное железо). Длина и высота ступенчатой или наклонной решетки

ограничены возможностью чистки колосников сверху, т. е. длиной лома и ростом обслуживающего.

Генераторы Сименса, как и генераторы с газификацией на поду и с горизонтальными решетками, являются дешевыми и примитивными. Применяются они для топлив с высоким содержанием летучих, имеют малую производительность, дают не вполне удовлетворительный состав газа и большие потери в очажных остатках. Чистка и шуровка этих генераторов при спекающемся и шлакующемся топливе изнурительны и в значительной мере нарушают процесс газификации.

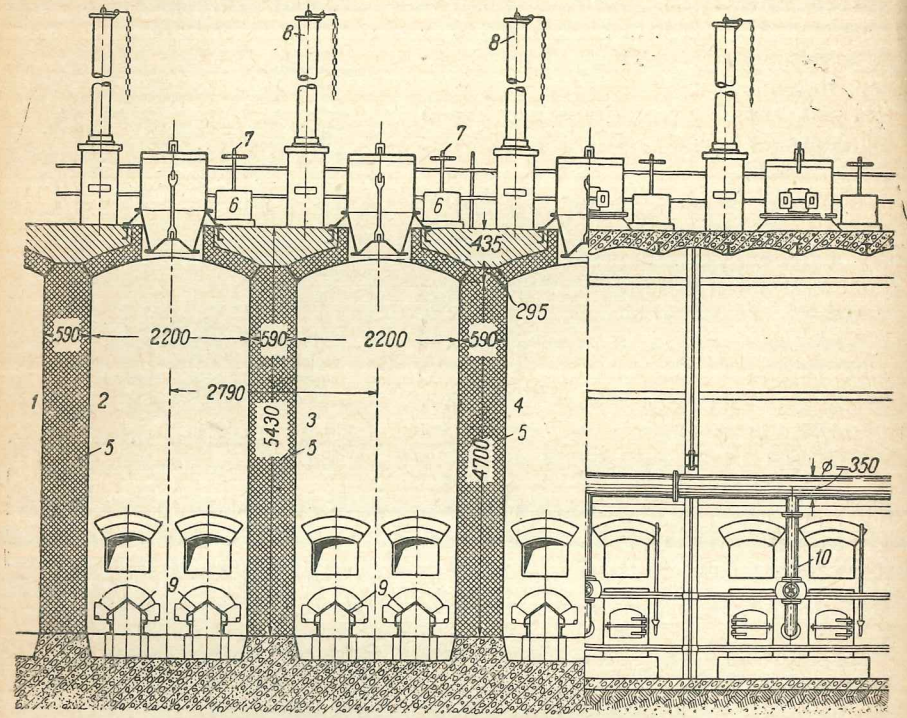


Рис. 57. Блок генераторов с крышеобразной решеткой:
1, 2, 3, 4 — шахты, *5* — внутренние стены, *6* — перекидные рукава, *7* — клапана рукавов, *8* — пусковые трубы, *9* — крышеобразные решетки, *10* — воздухопровод

Самодувные генераторы Сименса строить не рекомендуется. Что же касается этих же генераторов с дутьем, то в известных условиях для установок малых размеров они могут себя оправдать благодаря простоте и минимальной потребности в металле.

3. Генераторы с крышеобразной решеткой. К генераторам с крышеобразной решеткой относятся прямоугольные генераторы с решетками прямоугольной в плане и крышеобразной в разрезе формы, расположенными вдоль генератора («Дахрост»).

Генераторы «Дахрост» получили значительное распространение в Германии для газификации различных топлив. В последние годы их, по почину автора, строят и в СССР. Они представляют собой опре-

деленный шаг вперед сравнительно с генераторами Сименса, так как имеют бóльшую производительность и более экономичны. На рис. 57 и 58 представлен подобный генератор, осуществленный в СССР по проекту автора настоящей работы для торфяного топлива на стекольных заводах. Он снабжен двумя крышеобразными решетками (возможно применение и одной), лежащими на опорных чугунных балках. Решетки составлены из отдельных секций и снабжены многочисленными отверстиями. Обслуживаются решетки с обеих сторон через дверки, монтированные на фронтовых плитах.

В генератор через две трубы, по одной с каждой стороны, подается паровоздушное дутье. Каждая труба соединяется с чугунным тройником, заложенным в кладке генераторов. В воздухоподводящие трубы подается также пар для увлажнения дутья. Таким образом чугунными тройниками подается паровоздушная смесь у обоих краев колосниковых решеток. Поддувало сделано бетонным и может быть заполнено водой. Когда на колосниках накапливается значительный слой золы, производят чистку генератора. Для этой цели во избежание выбивания пламени при открывании дверки генератор отключают от сборного газопровода. Дутье в период чистки останавливают. Масса над колосниками прошуровывается через отверстия во фронтовой плите и кладке. При сильном шлакообразовании и образовании комьев для разбивания их могут быть использованы большие отверстия в кладке, находящиеся над колосниками.

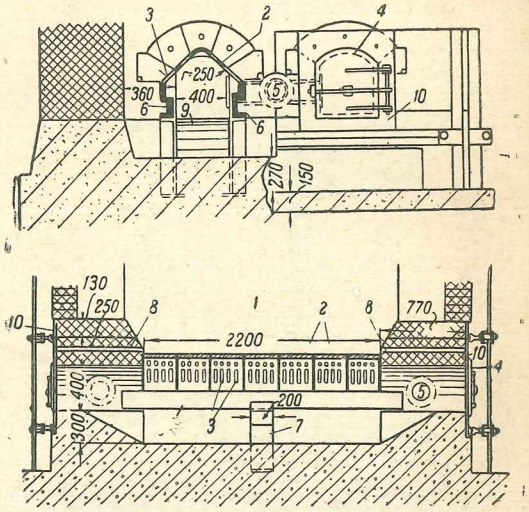


Рис. 58. Крышеобразная решетка:
1 — шахта генератора *2* — колосники, *3* — прозоры для прохода воздуха, *4* — дверка, *5* — подвод дутья, *6* — опорные балки, *7* — промежуточная опора балок, *8* — шуровочные отверстия, *9* — поддувало, *10* — фронтовая плита

Достоинством этих генераторов являются их дешевизна, малая затрата металла, хорошее распределение дутья по сечению генератора и в результате надлежащее распределение зон, получение хорошего газа и экономичность работы. Располагаются они обычно в блоке. Преимуществом применяемого в этих генераторах сухого затвора (с помощью прижатой к стене фронтовой плиты) сравнительно с водяным является достижимость хорошего осмотра решетки и наблюдения за количеством шлака, удаляемого в разных частях решетки. Иногда и свойства золы топлива вызывают необходимость в сухом затворе. При тщательном обслуживании можно избежать удаления частиц угля. Недостатком генераторов с крышеобразной решеткой является

ручное обслуживание и необходимость остановки дутья при чистке решетки. При обслуживании печи батареей генераторов выключение генератора для чистки значения не имеет.

4. Генераторы с круглой решеткой. Генератор с круглой решеткой представлен на рис. 59. Он снабжен железным кожухом и покоится на металлических колоннах. Соответственно форме шахты колосниковая решетка круглая. Первоначально решетку делали из одного чепца, и дутье подавалось преимущественно в середину шахты, где и имели место сильное горение и шлакообразование. Позднее стали применять большие многоступенчатые решетки, более обеспечивающие равномерное распределение воздуха по сечению. Иногда, как показано на рис. 59, в целях улучшения распределения дутья при больших диаметрах генераторов воздух подводят секционно к колосникам и дополнительно с периферии генератора с помощью кольцевого канала, расположенного по окружности генератора. При этом количество поступающего в разные места воздуха и пара должно тщательно регулироваться во избежание прогаров и шлакования. В чугунной крышке и своде имеются отверстия, служащие для шуровки с помощью штанг. Также и в кожухе с боков, над местом подвода воздуха, устраиваются отверстия для измельчения шлаков. Генератор снабжен водяным затвором, из которого вручную извлекаются зола и шлак без выключения дутья. Сравнительно с более старыми системами эти генераторы имеют преимущества в смысле наличия дутья и водяного затвора, т. е. большей производительности, а также непрерывности работы. Следует отметить, что при сильном шлаковании топлива иногда бывает неизбежна остановка дутья.

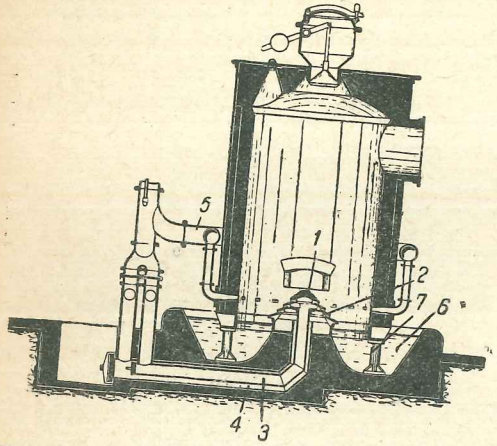


Рис. 59. Генератор с круглой неподвижной решеткой (Моргана):
1 — головка-чепец, *2* — кольцевые колосники, *3* — подвод дутья к центру решетки, *4* — подвод дутья к периферии решетки, *5* — подвод дутья к периферии генератора, *6* — гидравлический затвор, *7* — опорная колонна генератора

Распределение воздуха в этих генераторах хуже, нежели в генераторах с крышеобразной решеткой. В блоке очевидно они построены быть не могут. Эти генераторы существуют на некоторых заводах в СССР.

Генераторы с круглыми неподвижными решетками и гидравлическим затвором называют генераторами Моргана.

Генераторы с механической решеткой

Ручная чистка генератора от золы и шлака является тягостной и нарушающей режим операцией и поэтому мысль конструкторов давно

работала в направлении изыскания способов механического удаления золы и шлака. Практическое значение механическое удаление золы и шлака приобрело в Европе лишь с 1904 г., когда Керпели удалось сочетать путем применения вращающихся решеток механизацию этого процесса с одновременным улучшением процесса газификации.

В США механическое удаление золы применялось в механических генераторах Юза уже в 1898 г. и даже раньше.

1. Принцип устройства. Шахта генераторов с вращающимися решетками (рис. 60) — круглая, снабжена железным кожухом и покоится на чугунных или железных стойках. Решетка закреплена на чугунной чаше и вращается вместе с ней. Содержимое генератора лежит на решетке и чаше. Вне чаши к кожуху или стойке неподвижно прикреплен железный лемех (шлаковый нож).

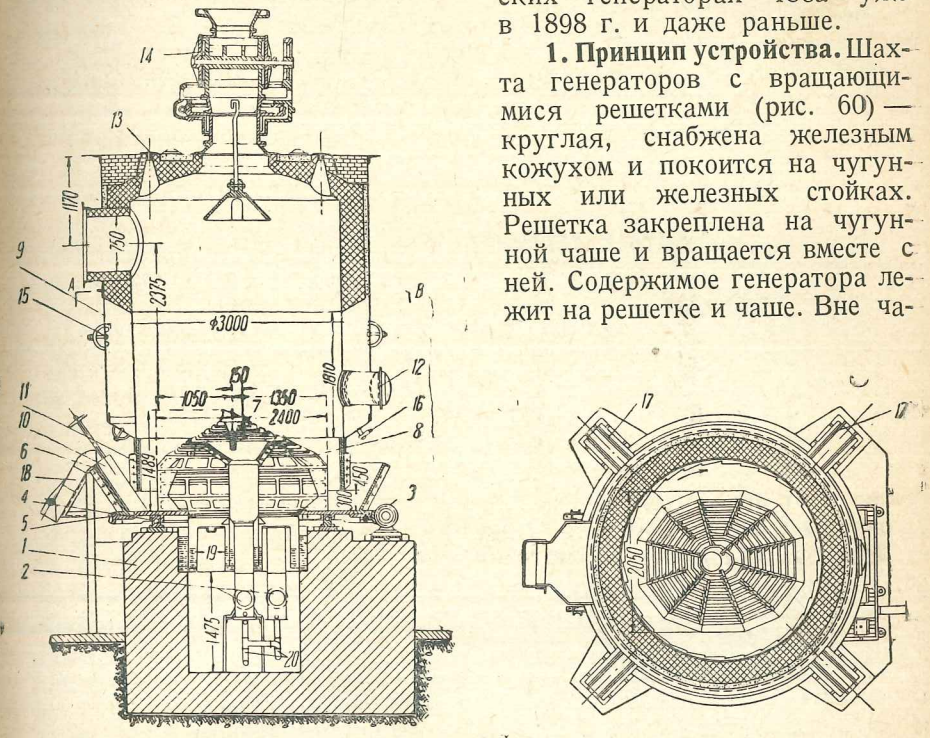


Рис. 60. Генератор с вращающейся решеткой типа Керпели:
1—фундамент, *2*—подвод дутья, *3*—привод, *4*—шаровая опора, *5*—поддон, *6*—борт чаши, *7*—центральная часть решетки с флянцем, штуцером и вертикальной трубой, опущенной в гидравлический раствор, *8*—периферийная часть решетки, *9*—охлаждающий кожух, *10*—шлаковый нож, *11*—фартук, *12*—люк генератора, *13*—шуровочное отверстие, *14*—автоматический загрузочный аппарат, *15*—люк охлаждающего кожуха, *16*—продувочный кран, *17*—опорная колонна генератора, *18*—лоток для золы, *19*—гидравлические затворы, *20*—трубки для отвода конденсата

При вращении чаши зола и шлак вращаются вместе с ней, причем шлак раздавливается; при попадании на неподвижный лемех они скапливаются в одном месте и переваливаются через борт чаши.

На место удаленных золы и шлака в чашу изнутри генератора выдавливаются новые порции их. Регулированием скорости вращения чаши и высоты подъема лемеха достигается изменение количества выгребаемых остатков. Перед лемехом в чаше зола набирается толстым слоем, а за ним почти отсутствует. Это несколько нарушает распре-

деление зон в самом генераторе и равномерность удаления золы по сечению. Для избежания этой неравномерности иногда лемех не опускают до дна чаши и кроме сбрасывающего лемеха закрепляют на кожухе несколько более коротких ножей, не выгребающих золы, что способствует более равномерному распределению золы в генераторе. Зольная чаша обычно заполнена водой и в нее погружено железное или чугунное кольцо — фартук, прикрепленный к кожуху генератора. Таким образом создается водяной затвор, отделяющий внутренность генератора от внешнего воздуха.

Иногда при необходимости большого давления или в силу особых свойств золы применяют сухой затвор.

Помимо механизации удаления золы и шлака Керпели преследовал также цель приведения решеткой в движение слоя золы и топлива с тем, чтобы предотвратить образование больших комьев шлака.

Для максимального воздействия на слой топлива и шлака были применены высокие эксцентричные решетки; эксцентриситет способствует также выдавливанию из шахты шлака и золы.

Зола у бортов чаши при вращении чаши и выемке может под влиянием давления слоя в генераторе устанавливаться на некотором определенном уровне. Обычно зола при вращении чаши без помощи ножа не выбрасывается.

2. Приводной механизм чаши. Вращение чаши производится с небольшой скоростью, изменяемой в зависимости от зольности топлива и от производительности генератора. Обычные пределы регулировки продолжительности оборота чаши колеблются от 1 до 4 час.

Привод выполняет ответственную работу, от которой зависит успешная работа всего генератора; поэтому к приводу предъявляются высокие требования в отношении его прочности, надежности действия и простоты конструкции.

Имеются различные конструкции приводов. Наиболее распространены червячные привода с храповым или фрикционным механизмом периодического действия с эксцентриковой передачей и вращением от электромотора.

Кроме того привода бывают червячные или шестеренные постоянного действия, с цепной или шестеренной передачей от электромотора. Бывают также привода гидравлические, имеющие небольшое распространение.

На рис. 61 и 62 показаны храповой и фрикционный привода.

Устройство храпового привода следующее. На наружной части поддона крепится отдельными сегментами зубчатый червячный венец. Венец входит в зацепление с червяком на станине привода. Обычно червяк выполняется пустотелым и насаживается на шпонке на стальной вал. С торцов червяка устанавливаются упорные шариковые подпятники для восприятия осевого давления.

Стальной вал покоится на двух подшипниках, нижняя часть которых отлита вместе со станиной.

На консольной части стального вала посажено храповое колесо, имеющее уширенную в обе стороны чугунную втулку. На втулку надет массивный вертикальный рычаг, имеющий в верхней части две

собачки, а в нижней — прорезь для ползушки кривошипа. Кривошип сидит на оси редуктора, вращаемого электромотором.

При вращении кривошипа ползушка сообщает рычагу качательное движение, и при каждом качании рычаг проворачивает при помощи собачек храповое колесо на некоторый угол в зависимости от эксцентриситета установки пальца кривошипа. Регулировка зацепления возможна в пределах от 0 до 3 зубьев храпового колеса за один ход.

Вращение храпового колеса передается червяку через предохранительную кулачковую муфту, закрепленную на конце вала.

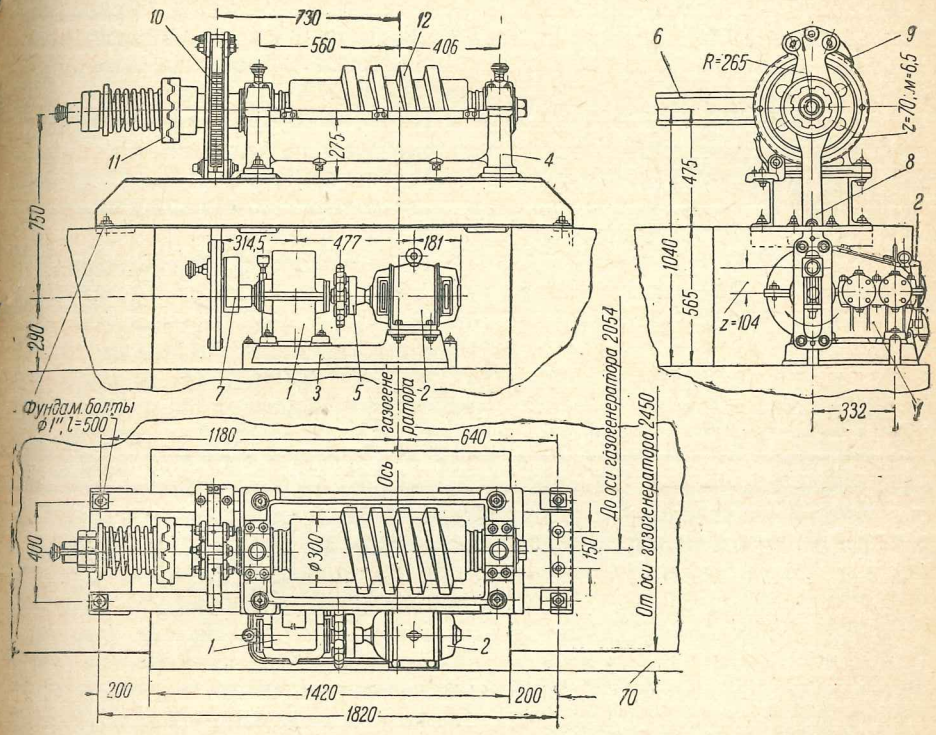


Рис. 61. Индивидуальный привод генератора диаметром 3 м с храповым механизмом (стандарт Газмонтажпроекта):

1—редуктор шестеренный *i*—20,5, *N* 3 л. с., *n*—950 об/мин., *2*—электромотор трехфазного тока ИЗО 31/6, *N* 2 *кв*, *n*—950 об/мин., *3*—плита под мотор и редуктор, *4*—приводной механизм, *5*—эластичная муфта, *6*—зубчатый венец поддона, *7*—кривошип (регулируемый), *8*—рычаг, *9*—собачки рычага, *10*—храповое колесо, *11*—кулачковая муфта *12*—червяк

Муфта состоит из двух половинок, сжимаемых пружинкой. Усилие, создаваемое пружинкой, регулируется посредством гайки и рассчитано на передачу муфтой вращающего момента, соответствующего максимальному усилию на червячном ободе в 5000 *кг*. При превышении этого усилия муфта разжимается, и кулачки проскакивают.

Для предохранения храпового колеса от обратного вращения на

раме привода установлены две собачки, сидящие на общей оси подшипника.

Во фрикционном приводе (рис. 62) в отличие от храпового вращение червяка производится фрикционным колесом *17*. Сцепление фрикционного колеса с качающимся рычагом *14* производится посредством колодок *12* и *13*, зажимающих обод фрикциона при ходе рычага вправо. При обратном ходе под действием собственного веса колодки свободно скользят по ободу фрикциона. Возможность обратного проворачивания фрикционного колеса устраняется при помощи тормозных колодок *18* и *19*.

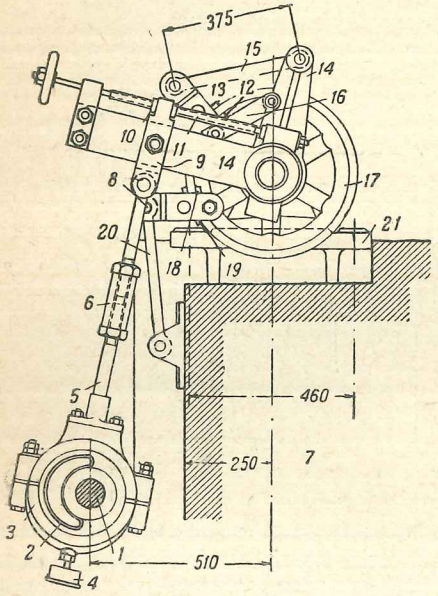


Рис. 62. Фрикционный привод:

1 — вал трансмиссии, *2* — эксцентрик, *3* — хомут эксцентрика, *4* — штауфер, *5* — штанга, *6*—стяжная гайка, *7*—фундамент привода, *8*—шарнир, *9*—ползун, регулирующий ход зажимных колодок, *10*—гайка ползуна, *11* — винт с маховичком для перестановки ползуна, *12* и *13*—зажимные колодки, *14* — рычаг, *15* и *16* — тяги, *17* — фрикционное колесо, *18* и *19*—тормозные колодки, задерживающие фрикционное колесо при обратном ходе, *20*—тяга, *21*—опорная плита

Регулировка числа оборотов фрикционного колеса производится винтом *11*, передвигающим ползун *9* по плечу рычага *14*.

Качание рычага производится эксцентриком *2* и тягой *5*.

По своему качеству обе конструкции приводов являются почти равноценными.

Преимуществом фрикционного привода является возможность более точной регулировки (не по зубьям, как у храповика), но недостатком является склонность фрикционного колеса при известном срабатывании колодок к пробуксовыванию. В этом отношении храповой привод является более надежным. Расход мощности у обоих приводов одинаковый. Для расчета привода величина окружного усилия на начальной окружности зубчатого венца принимается равной 4000—5000 *кг*, что определяет требуемую мощность индивидуального мотора в 1,5 — 2 *квт*. При групповом приводе требуемая мощность моторов на один генератор меньше—около 1 *квт*.

Чаша вращается на шарах диаметром в 90 *мм* или на роликах. Шары помещаются в кольце, состоящем из двух частей — верхней и нижней. Верхняя прикреплена к поддону чаши, а нижняя укрепляется на фундаментной плите. Расположение шаров определяется связывающей их обоймой — цепью с гнездами для шаров.

При вращении решетки, особенно эксцентричной, в генераторе возникают боковые усилия. Для восприятия их половины кольца иногда делятся не по средней оси, при этом внешняя стенка нижнего кольца кончается выше центра шаров и, воспринимая боковое давление шаров, не дает возможности вытеснить их.

Шары применяются стальные, кованые или закаленные, обоймы — стальные. Первоначально выполняли исключительно шаровые опоры, причем бывало много неполадок в связи с тем, что из соображений экономии применяли чугунные необработанные шары.

При устройстве роликовой опоры поддон чаши вращается на роликах. Стойки, несущие ролики, прикрепляются или к поддону чаши или к фундаментной плите. Горизонтальные усилия воспринимаются специальными горизонтальными роликами, ограничивающими прикрепленное к чаше кольцо. Возможно устройство конических поддерживающих роликов, воспринимающих боковые усилия и делающих излишними боковые ролики. Преимуществом роликовых опор являются наличие свободного пространства под чашей и возможность осмотра и смены роликов.

Ролики должны быть снабжены закаленными осями и бронзовыми втулками. Боковые ролики должны иметь регулирующие установочные приспособления. Стоимость обеих конструкций одинакова.

3. Типы механических решеток. Имеется очень много вращающихся колосниковых решеток, различных по форме. Они состоят из нижней опорной коробки, колосников (ступенчатых, веерообразных, чешуйчатых и др.) и головки. Вся система охватывается болтами. Для ломки шлака при вращении решетки последней придается соответствующая форма — эксцентричная, многогранная, квадратная, — или же решетка снабжается ребрами. Дутье подводится под решетку генератора и распределяется по щелям, образуемым колосниками.

Для лучшего распределения дутья и возможности регулирования количества и влагосодержания дутья, подаваемого в различные части генератора, применяют секционную подачу дутья, подводя его раздельно к группам колосников (рис. 60).

При больших размерах генераторов иногда применяют, как и в генераторах Моргана, помимо подачи под колосники также и периферийную подачу дутья.

Колосниковая решетка фирмы «Керпели» представлена на рис. 60. Она имеет полигональную, эксцентричную форму и при вращении раздавливает основанием о фартук крупные куски шлака и выталкивает золу и шлак в чашу по мере опорожнения последней. Вращение решетки вызывает также движение топлива, в известной степени предупреждающее спекание шлака. Решетка состоит из опорной нижней коробки, закрепленной на зольной чаше, и отдельных колосников, накладываемых друг на друга. Сверху решетки находится головка. Сквозь прозоры между колосниками проходит в генератор воздух, подаваемый из трубопроводов внутри фундамента под решетку. Устройство решетки предусматривает секционную подачу дутья к центральной и периферийной частям решетки.

На рис. 63 представлен генератор с решеткой Гильгера, имеющей в СССР значительное распространение. Решетка состоит из нижней конической коробки и головки — звездочки. Решетка расположена центрально, коробка и головка имеют ребра, дробящие шлак и приводящие в движение топливо при вращении решетки. Воздух подается через большую горизонтальную щель между колосниками. Звездочка расположена сравнительно высоко и подвергается опас-

ности сгорания при низком опускании раскаленной зоны. Особенностью конструкции является также специальный привод, дающий возможность автоматически вращать чашу попеременно в обе стороны с разными ходами, благодаря чему чаша может находиться беспрерывно в интенсивном движении, а удаление золы имеет место лишь соответственно разности ходов решетки в обе стороны. Распределение дутья этой решеткой неудовлетворительно (см. ниже).

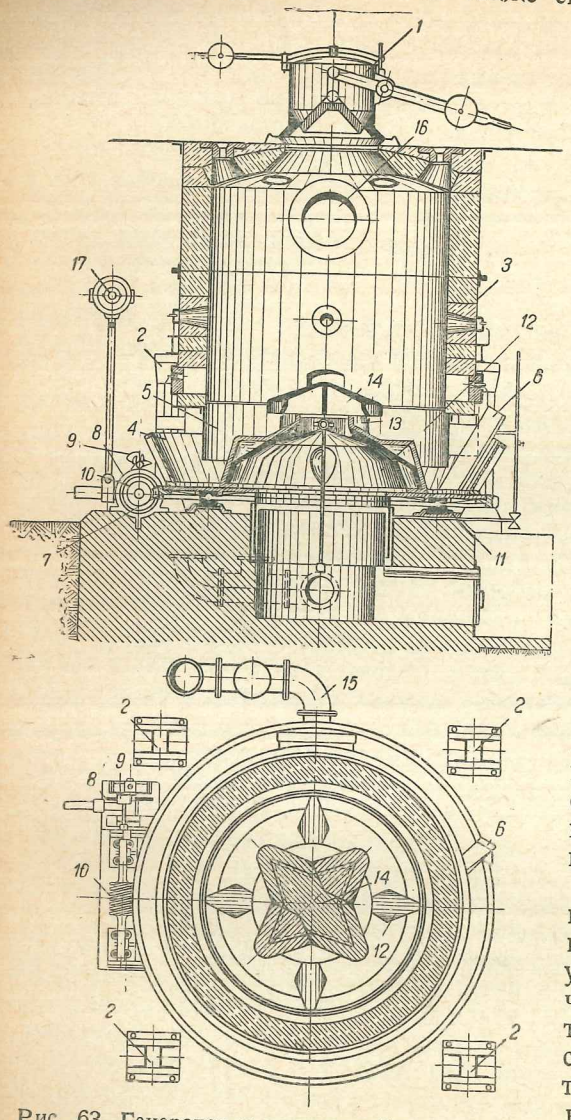


Рис. 63. Генератор с вращающейся решеткой Гильгера

1—загрузочная коробка, *2*—опорная колонна, *3*—железный кожух, *4* — чаша, *5* — фартук. *6* — лемех, *7*—зубчатый венец чаши, *8*—храповое колесо, *9*—собачка, *10* — червяк, *11* —шариковая опора чаши, *12*—основание решетки, *13*—щель для воздуха, *14*—головка решетки, *15*—подача воздуха в генератор, *16*—отвод газа, *17*—трансмиссия для привода чаши

При обычных ломающих шлак решетках, если требуется только ломание шлаков, но не удаление золы, вытягивают лемех и пускают чашу во вращение.

Большое значение для равномерности работы и производительности генератора имеет чистота щелей решетки. В случае попадания туда золы она должна просыпаться внутрь, под решетку, но не уплотняться в щелях.

На рис. 97 представлен генератор с решеткой Лимна — Рамбуша [120]. Она устроена таким образом, что при вращении изогнутые конические поверхности секторов шевелят слой топлива. Решетка вызывает передвижение нижних слоев содержимого генератора от центра к краям, удаляя тем самым золу и шлак в нижнюю часть генератора, где они раздавливаются вертикальными поверхностями решетки. Щели колосников, распределяющие дутье, расположены косо, благодаря чему они предохранены от засорения золой при вращении решетки в одну сторону. Сектора решетки иногда снабжают щелями для дутья.

Чередование в решетке частей, снабженных щелями для подачи дутья, и сплошных секторов имеет следствием перемещение при вращении решетки дутьевых щелей. Это должно затруднить прохождение дутья через отдельные каналы, образующиеся в слое топлива, и препятствовать образованию прогаров.

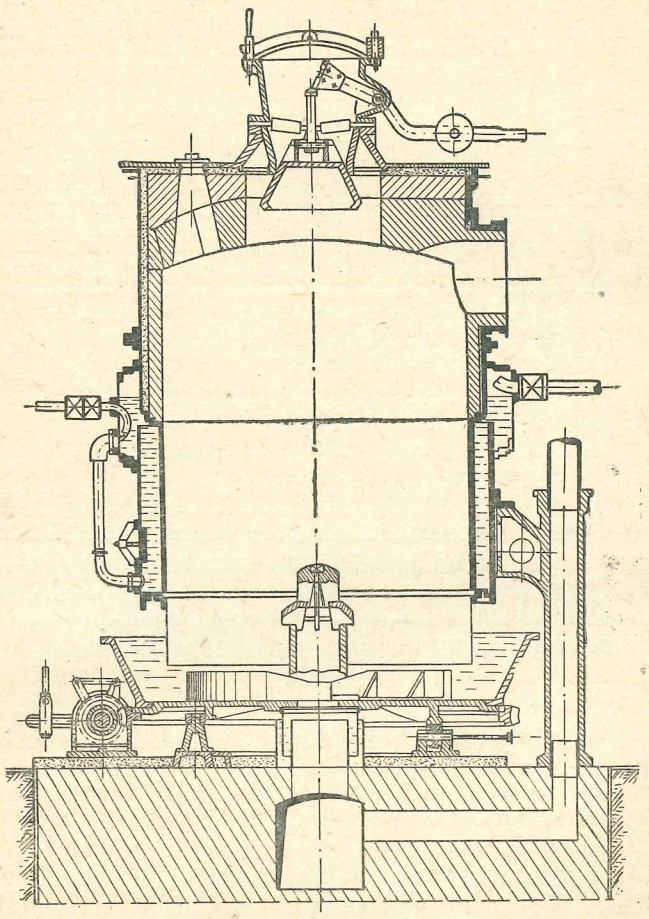


Рис. 64. Генератор Демага

На рис. 87 представлена решетка Дейца. Она состоит из конических, расположенных эксцентрично чешуеобразных колосников.

При вращении решетки отдельные колосники соответственно изгибу их поверхности вызывают движение топлива. Благодаря конической форме и эксцентричному движению колосников содержимое генератора проталкивается в наружную часть чаши. Верхняя поверхность колосников изогнута таким образом, что одна часть ее проталкивает при своем движении лежащую на ней массу, а другая обра-

зует с нижним колосником щель, открытую в одну сторону. При вращении решетки по часовой стрелке щели перекрыты и не могут засориться золой. В распределении дутья этой решеткой имеются недочеты (см. ниже).

При газификации Челябинского угля в генераторах без швельшахты диаметром 2,6 *м* сравнение решеток Коллера и Дейца (с заделанными нижними щелями) выявило преимущества решетки Дейца, как приспособления для разрушения шлака.

На рис. 64, 65 и 88 представлены решетки фрезерного типа систем Коллера (A. V. G.) и Демага, отличающиеся формой фрезеров и чаши. При вращении подобной решетки содержимое шахты передвигается от центра к периферии с помощью спирально изогнутых лопастей-фрезеров, подрезающих золу и шлак снизу по всему сечению генератора, выносящих их наружу и раздавливающих крупные куски шлака о фартук. В результате равномерного удаления золы имеет место равномерное опускание топлива и надлежащее распределение зон.

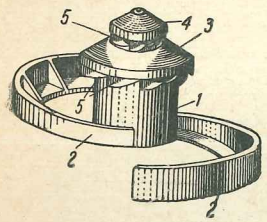


Рис. 65. Решетка Демага (деталь рис. 64):
1— основание решетки, *2*—винтообразные лопасти, *3*—колосник, *4*—головка, *5* — щели для дутья

Через центральную часть решетки подается дутье. Так как эта часть решетки имеет малый диаметр, то при мелком топливе и большом диаметре генератора воздух может поступать в недостаточном количестве к топливу, лежащему вблизи стен.

Иногда взамен вращающихся решеток применяют генераторы с неподвижной большой плоской решеткой (генератор Геца) и снабжают их специальным S-образным вращающимся над решеткой скребком — золоудалителем. Решетка имеет многочисленные щели, и благодаря большой площади ее воздух равномерно распределяется по всему сечению.

Решетка в случае засорения может быть прочищена снизу без опорожнения генератора; зола в случае гигроскопичности не может впитывать в себя влагу.

Периодически вращающийся скребок медленно сдвигает золу во вращающуюся зольную чашу, из которой зола удаляется обычным путем.

Эти генераторы за границей применяются для бурого угля и буроугольных брикетов. При удалении золы с горизонтальной решетки скребком она сильно измельчается.

В Америке эта решетка в измененном виде, под названием решетки типа ABC получила распространение для генераторов водяного газа.

Подобная решетка крестообразного типа вместе с нижней частью генератора показана [121] на рис. 66. Зола удаляется с горизонтальной неподвижной просверленной подобно решетке плиты вращающимся, охлаждаемым водой, крестообразным брусом. Бо́льшая часть золы падает через решетку непосредственно в воздухонепроницаемый зольный бункер. В этот бункер подводится газифицирующая смесь при газовании снизу, и из него отводится водяной газ при газовании

сверху. Крупные куски шлака разрушаются брусом об охлаждаемый водой фартук и падают в окружающую неподвижную решетку кольцевую чашу, вращающуюся вместе с брусом. Отсюда шлак с помощью лопаты-ножа удаляется в зольный бункер.

Этой решетке приписывается поддержание температурных зон в горизонтальном положении. На рис. 67 представлен план подобной решетки генератора водяного газа с одинарным S-образным брусом.

Решетка генератора Чапмана для получения смешанного газа, также имеющая вид бруса или гребка, представлена [122] на рис. 83. На

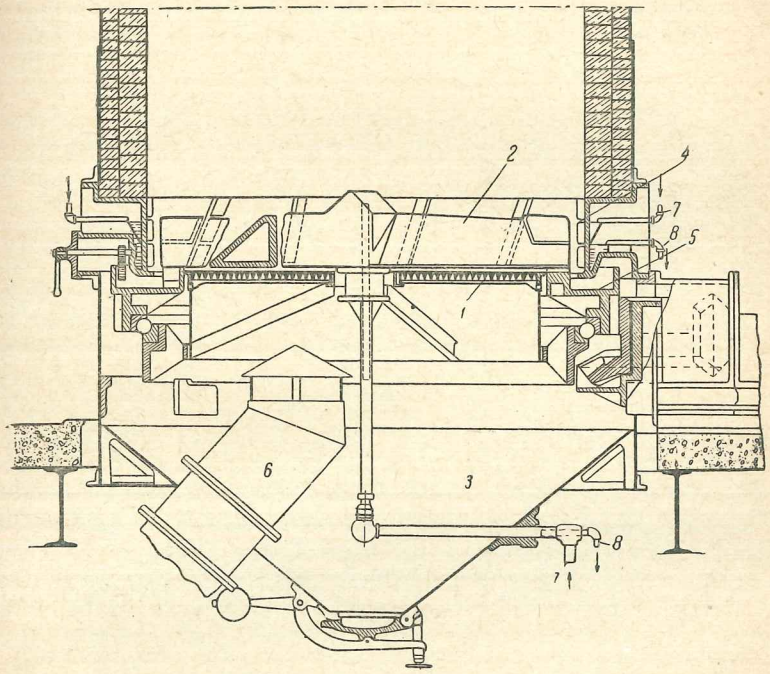


Рис. 66. Решетка ABC крестообразного типа:
1—горизонтальная неподвижная решетка, *2* – крестообразный брус, 3 — зольный бункер, *4*—охлаждаемый водой фартук, *5*—кольцевая чаша, *6*—подвод дутья, *7*—подвод воды, *8*—отвод воды

гребке расположены чепец и колосники, перекрывающие дутьевую трубу и вращающиеся с гребком.

Очень интересным в этом генераторе является устройство, позволяющее с помощью штурвала на ходу поднять или опустить чепец и следовательно изменить распределение дутья по сечению генератора.

У чепца на гребке болтами закреплены ножи для передвижения шлака к периферии. У стен шахты на гребке расположена вторая пара ножей, раздавливающая шлак о фартук, снабженный приливами. Гребок закреплен на зубчатом бандаже, охватывающем шахту снаружи. Бандаж (а с ним и гребок) вращается на горизонтальных роликах и направляется вертикальными роликами. К бандажу снизу прикреплены скребки, захватывающие при вращении бандажа золу

и шлак и сбрасывающие их в приемные ямы с помощью двух наклонных очищающих ножей.

Привод бандажа и гребка от электромотора мощностью в 5 *квт* — с помощью редуктора, шкива с кривошипом, храпового механизма и червячной передачи. Скорость вращения, а следовательно и удаления золы, регулируется храповым механизмом.

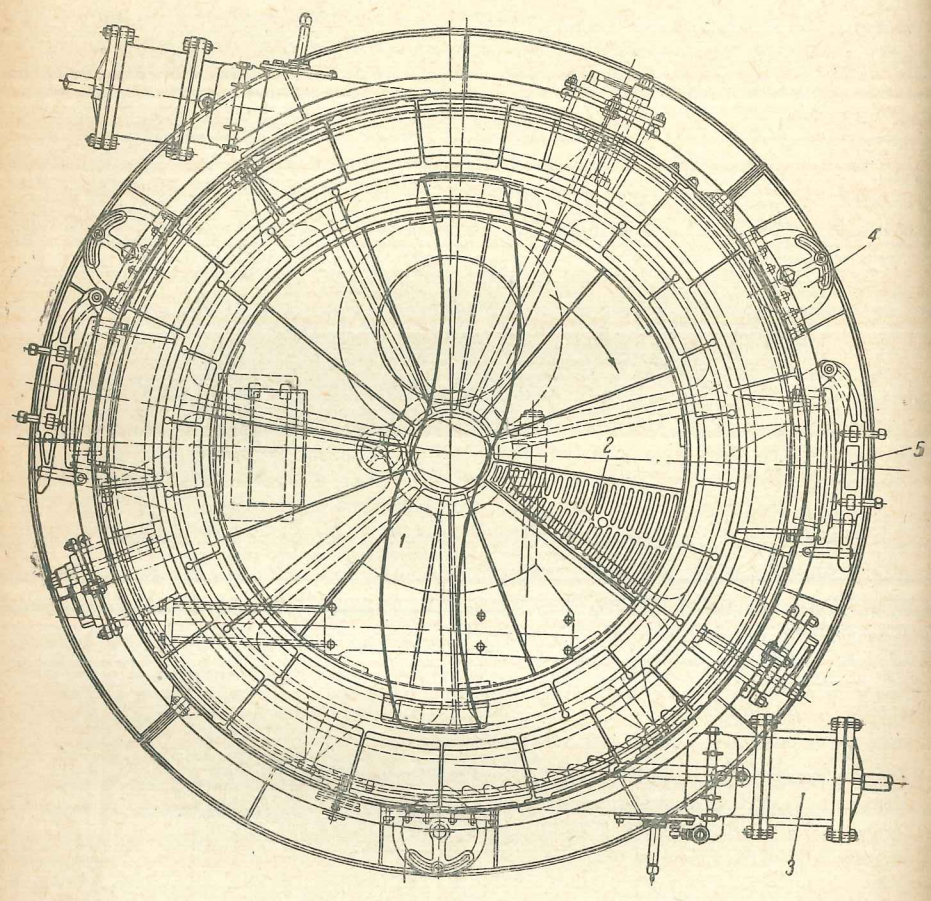


Рис. 67. Решетка АВС:
1—брус, *2*—плоская секторная решетка, *3*—гидропривод для вращения решетки, *4*—центрирующие ролики, *5*—лаз

Сравнительно давно делаются попытки устройства решеток из нескольких частей, позволяющих лучше отрегулировать распределение дутья и удаление золы по сечению, что имеет особенное значение для генераторов больших размеров. В кольцевом генераторе Тренклера (рис. 113) распределение дутья осуществляется ступенчатой решеткой, а удаление шлака — вращающейся решеткой. В кратерной решетке Газогенераторстроя для генератора диаметром в 5 *м* подача

дутья осуществляется многочисленными мелкими отверстиями, а удаление шлака производится через два кольцевых отверстия.

На рис. 162 представлен [123] генератор с вращающейся решеткой, в котором к обычной вращающейся решетке добавлена кольцеобразная боковая решетка из труб. Конструкция такова, что образуются две зоны горения, не зависящие друг от друга. Благодаря этому зону, образуемую боковой решеткой, в зависимости от требований можно включить, выключить или нагрузить. Этим достигается возможность быстро изменять нагрузку. Производительность генератора диаметром в 2,6 *м* за короткое время можно изменить с 7 до 45 *т* буроугольных брикетов.

Боковая решетка состоит из отдельных трубчатых элементов, через которые проходит подсмольная вода. Для устранения прогаров стен шахта внизу сужена. Трубчатые элементы расположены с небольшими промежутками и образуют цилиндр, являющийся стенкой шахты. Воздух, который подается в боковую решетку, поступает предварительно в кольцевой канал. Щели в распределительном канале регулируют подачу воздуха.

Зола, падающая через боковую решетку, забирается и выносится чашей. Забивание боковой решетки золой не может иметь места. Центральная решетка — обычной конструкции и легко доступна обслуживанию снизу. Чаша приводится во вращение отдельным приводом.

В зависимости от формы решетка может больше или меньше ломать образующиеся шлаки, более или менее равномерно распределять дутье по сечению и удалять остатки, более или менее быть подверженной сгоранию и износу и т. д.

Различают решетки плоские, высокие, ломающие, эксцентричные, центральные, с развитой поверхностью и др. Плоские решетки имеют малую высоту и не имеют выступающих частей на колосниках и головке.

Шурующее действие решетка имеет лишь при эксцентричном расположении ее или при наличии выступов. Так как ломка образовавшихся крупных кусков шлака происходит между основанием решетки и нижней частью шахты, то во избежание сильного износа кладки шахты ее предохраняют в этом случае специальными металлическими плитами, иногда снабженными вырезами для защемления кусков шлака.

При сильно шлакующемся топливе иногда применяют высокие решетки, расположенные эксцентрично.

При некоторых топливах не рекомендуется применение сильно шурующих решеток из-за распадения топлива в плотно лежащую мелочь. Особенное значение это имеет для бурых углей, и без того непрочных и склонных распадаться.

Предлагались особо сильно шурующие решетки, как например решетка Ремана, состоящая из четырех высоких секций, из которых одна — самая высокая — в середине. Каждая секция состоит из четырех колосников, распределяющих дутье, шевелящих при вращении решетки топливо и ломающих шлак. Воздух подается в центральный сборник и отсюда распределяется по всей решетке. Под каждую

секцию решетки подводится паровая трубка для подачи пара. Большого распространения эти решетки не получили.

4. Устройство для сухого золоудаления. В генераторах для получения водяного газа часто применяют сухое золоудаление вследствие необходимости работать с дутьем высокого давления, при котором гидравлические затворы получились бы чрезмерно высокими и зола не могла бы подняться достаточно высоко. Вообще же в этих генераторах применяют как сухое, так и мокрое золоудаление, причем и то и другое устройство имеет свои достоинства и недостатки. При мокром затворе неприятны сильные колебания уровней затворов вследствие изменения давления при перестановке задвижек, зато это устройство легко доступно снаружи во время работы; при сухом затворе механизм его недоступен во время работы, так как он закрыт и осмотр его возможен лишь при остановке генератора, кроме того карман зольного затвора может быть опорожнен также лишь при остановке генератора, зато это устройство позволяет применять большие и колеблющиеся давления [124].

В газогенераторах для получения смешанного газа вращающиеся решетки с сухим золоудалением применяются редко, преимущественно в случае соответствующих свойств золы и работы с высоким давлением. На рис. 97 представлено устройство механизма сухого золоудаления генератора водяного газа.

Золоудаление осуществляется с помощью вращающегося поддона и решетки системы Лимна — Рамбуша, смонтированной на поддоне. Уплотнение нижней части генератора сухое и производится металлическим кожухом, основная плита которого служит опорой для поддона решетки.

На основной плите кожуха установлены опорные и упорные ролики, поддерживающие чугунный поддон с колосниковой решеткой.

Кожух снабжен двумя карманами, в которых собираются зола и шлак. При вращении поддона зола ссыпается в карманы, в которых несколько охлаждается. Регулирование количества удаляемой с поддона в карман золы производится с помощью шлаковых ножей. С помощью винта и рычага, сидящего на одном валу с ножом, можно изменять угол наклона ножа к окружности вращения поддона, и таким образом нож может захватывать и сталкивать большее или меньшее количество золы.

Нижняя часть кармана снабжена клапаном, который плотно закрывает отверстие и переставляется с помощью гидравлического управления. Последнее состоит из гидравлического цилиндра, в котором ходит поршень, соединенный с рейкой, приводящей во вращение зубчатое колесо, на оси которого расположены рычаги, открывающие и закрывающие клапан.

В верхней части кармана предусматривается люк размерами 400 × × 400 *мм* для осмотра и чистки кармана. Этот люк иногда прикрывают предохранительным клапаном.

Периодически при включении генератора задвижки карманов открываются, и зола и шлак удаляются в вагонетку, устанавливаемую под карманом. В дутьевой коробке под решеткой возможно скопление золы и пыли, уносимых с газами, для удаления которых служит

специальный клапан. Через отверстия клапанов в кожухе и в дутьевой коробке возможен при выключении генератора осмотр решетки и приводных приспособлений.

В некоторых больших генераторах водяного газа применяют для механического удаления золы и шлака и другие решетки, совершенно отличного от описанной типа, а именно с вращающимся брусом (см. выше решетки Геца и АВС).

5. Распределение дутья вращающимися решетками. Для равномерности распределения воздуха по сечению генератора важно надлежащее положение воздушных щелей в решетке. Важно подать дутье так, чтобы оно распределялось в генераторе соответственно количеству топлива, проходящему через отдельные участки, а не проходило преимущественно у мест меньшего сопротивления, в частности у стен, где топливо лежит более рыхло, вызывая периферийный огонь, прогары и сжигание газа, особенно при неоднородном и мелком топливе.

В значительной мере выравниванию распределения дутья способствует слой золы. При зашлаковывании генератора достигнуть равномерного распределения дутья затруднительно.

По исследованию проф. Н. Н. Доброхотова [125], при решетках Гильгера, имеющих одну щель, воздух устремляется преимущественно к стенкам, поднимая в этих местах уровень раскаленной зоны (сниженной над головкой).

Распределение дутья в решетках Гильгера было улучшено проф. Н. Н. Доброхотовым путем дополнительной установки центрального колосника малого диаметра.

В решетке Дейца при интенсивности газификации свыше 150 *кг/м² час* выявляется излишняя подача дутья к периферии (излишний сход золы с головки), что устраняется применением глухого колосника взамен нижних трех.

Особенно затруднительно равномерное распределение дутья в генераторах большого диаметра. В СССР в генераторах водяного газа диаметром 3,6 *м* с успехом применяются решетки Лимна — Рамбуша. Вообще же при больших размерах генераторов желательно иметь возможность регулировать распределение дутья.

Вполне логично в решетках Керпели предусматривается секционная подача дутья, отдельно в центре и отдельно на периферии решетки, дающая возможность менять характер дутья не только в отношении давления, но и в отношении его влагосодержания, а в решетках Чапмана предусматривается регулирование раскрытия воздушных щелей.

Сторонники подачи дутья в центре генератора указывают, что именно в результате подачи дутья в месте наибольшего сопротивления слоя топлива осуществляется надлежащее его распределение по сечению; что касается ломки шлаков, то нужно принимать меры к тому, чтобы они не образовывались, так как полагаться на предупреждение шлакования решетками вообще не следует, тем более, что решетки с развитой поверхностью препятствуют равномерному сходу золы по сечению.

В последнее время довольно большое распространение получают

центральные решетки с фрезерами, в которых дутье подается в центре генератора, и благодаря наклону поддона удаляющаяся с центра генератора зола не препятствует удалению ее с периферии, в результате чего обеспечивается равномерное удаление золы, а следовательно и равномерное опускание слоя и равномерность процесса газификации.

Однако во многих случаях и эти решетки не обеспечивают хорошего распределения дутья, например в генераторах со швельшахтами, в которых средний слой трудно пронизывается газами, или в генераторах большого диаметра при низком слое и мелком топливе, в которых плохо пронизывается периферийная часть.

Большой интерес представляют конструкции (Вельмана, Моргана и др.), в которых решетка периодически включается и выключается для поддержания слоя шлака в разрыхленном и легко пронизываемом газами состоянии.

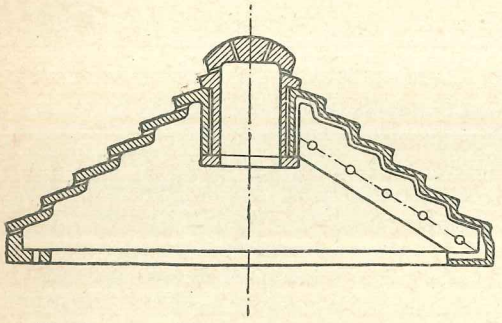


Рис. 68. Решетка Керпели высокого давления

Спор о преимуществах и недостатках решеток центральных и с развитой поверхностью не может считаться решенным.

При газификации мелких топлив с значительным содержанием пыли и с применением дутья большого давления имеет очень большое значение равномерность распределения дутья решеткой по сечению. Подобная конструкция осуществлена фирмой «Керпели». На рис. 68 представлена эта решетка.

Воздух распределяется многочисленными мелкими отверстиями (диаметром в 6 и 10 *мм*) равномерно по всему сечению генератора.

В этих решетках использован следующий принцип: чем больше сопротивление распределительных отверстий сравнительно с сопротивлением насадки (в данном случае топлива), тем равномернее распределяются газы, т. е. чем больше сопротивление решетки, тем меньшее значение имеет неравномерность сопротивления слоя топлива в отдельных частях.

Золоудаление при таких решетках применяется сухое ввиду большого давления дутья при мелком топливе и большого сопротивления мелких щелей.

Несмотря на ряд отдельных удачных выполнений, устройство этих генераторов не разрешило вопроса газификации мелкого топлива.

6. Преимущества и недостатки генераторов с вращающимися решетками. Преимущества генераторов с вращающимися решетками следующие: устранение тяжелой операции ручного удаления золы и шлаков, уменьшение ручной шуровки при шлакующемся топливе, уменьшение влияния удаления золы на процесс газификации, почти полный выжиг очажных остатков, равномерность процесса газификации, хорошее качество газа, увеличение производительности генератора сравнительно с другими системами.

Недостатком генераторов с вращающимися решетками является их высокая стоимость, а в известных условиях также значительное применение в них металлических частей. Эти генераторы требуют квалифицированного, тщательного и внимательного ухода за всеми их частями.

Сравнительные показатели работы генераторов воздушного и смешанного газа приведены в табл. 43—46.

В СССР разработкой конструкций газогенераторов занимается Газмонтажпроект (ГМП — бывш. Газогенераторстрой). Разработанные конструкции находятся на уровне лучших заграничных конструкций. На рис. 97 показана одна из последних конструкций. Разработаны также стандартные конструкции для различных производительностей и различных топлив. Табл. 47 характеризует показатели по этим генераторам. Дальнейшие работы направлены в сторону полной механизации обслуживания и большего экранирования шахты и крышки.

ГМП применяет следующие решетки: центральную фрезерную, типа Керпели, типа Дейца и типа Лимна-Рамбуша.

4. ЗАГРУЗОЧНЫЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ

Назначение

Назначение загрузочных приспособлений — подавать топливо в генератор. К ним предъявляется ряд требований: они должны равномерно распределять топливо по поверхности слоя в генераторе; должны давать возможность подавать в отдельные части генератора большее или меньшее количество топлива; должны обеспечивать достаточную разобщенность генератора от наружного воздуха, чтобы не было утечки газа и присоса воздуха в генератор; обслуживание их должно быть легкое и простое; они должны быть прочны и надежны в работе.

Форма загрузочной коробки зависит от формы кусков топлива и формы шахты генератора.

Для дров, применяемых в виде поленьев, коробки имеют прямоугольную форму. Иногда при прямоугольной форме генераторов подобные же коробки используют и для торфа. В остальных случаях применяют круглые коробки. Загрузочные приспособления могут приводиться в движение вручную и с помощью механизмов. К последним прибегают или при непрерывном питании или при необходимости подачи в генератор больших количеств топлива.

Коробки с одним клапаном

Загрузочные коробки первоначально делались с одним затворным клапаном. Подобные коробки в самодувных генераторах — для дров — и в генераторах водяного газа сохранились и до настоящего времени. При этих коробках (рис. 69) дрова накладываются на наклонную раму и упираются в железные полосы, прикрепленные к клапану коробки. При подъеме клапана дрова скатываются в ге-

Интенсивность газификации различных топлив в различных системах генераторов (в *кг* на 1 *м*² сечения в час)

Таблица 43

Тип генератора	Дрова		Торф	Бурый уголь	Брикеты бурого угля	Каменный уголь	Антрацит	Кокс
	поленья	щепа						
Самодувный с неподвижной решеткой и ручной шуровкой	100 — 150	—	50 — 75	50 — 100	50 — 90	35 — 70	—	—
С дутьем и неподвижной решеткой	150 — 225	300 — 400	100 — 300	75 — 150	80 — 120	60 — 120	60 — 120	60 — 120
С вращающейся решеткой	—	400 — 800	250 — 600	150 — 275	120 — 200	80 — 200	100 — 220	100 — 220
С автоматическим шуровочным приспособлением	—	—	—	—	—	200 — 350	—	—
С выпуском жидких шлаков	—	—	1000 — 2000	—	—	от 300 до 1000		

Примечание. Более высокие величины относятся к топливам, сортированным (не рядовым) и с лучшими свойствами золы и кокса. При благоприятных свойствах топлива в обычных генераторах диаметром до 3—3,6 *м* отдельные показатели могут быть увеличены.

Высота слоя и отдельных зон для различных топлив (в *мм*) в генераторах стационарного типа

Таблица 44

Слой \ Топливо	Дрова	Торф	Бурый уголь	Каменный уголь	Антрацит	Кокс
Весь слой над решеткой	3000 — 7000*	3000 — 7000	1200 — 7000	600 — 1700	700 — 1600	1000 — 2000
Слой золы		от 100 до 300			от 100 до 300	
Раскаленный слой	300 — 2500	300 — 2500	300 — 2500	400 — 1000	400 — 1000	100 — 600
Темный слой топлива	—	—	—	100 — 500**	200 — 500**	300 — 1700

* Для поленьев; при щепе может быть и меньше.
** После засыпки.

Тепловой баланс газификации различных топлив в различных конструкциях генераторов
(Расчет по верхнему пределу теплотворной способности)

Таблица 45

Тип генератора	Топливо: Род	A^p (в %)	W^p (в %)	$Q_в^p$ (в *кал*)	Распределение тепла (в % от всего прихода тепла): Теплотворная способность газа	Теплосод. сухого газа	Теплосод. влаги	Теплотворная способность смолы	С горючим в провале и в уносе	В окружающую среду	Примечание
Самодувный с горизонтальной решеткой	Дрова	0,3	22	3376	67,81	4,50	7,16	8,41[1]	1,35	10,77	[1] Выход и состав смолы взяты по литературным данным.
С неподвижной решеткой	Торф	2,6	30	3560	64,4	2,6	9,7	14,9[1]	1,2	7,2	
С вращающейся решеткой, швельшахтой и охлаждающей рубашкой	Торф	3,46	27,10	3788	67,17	7,37		19,55	0.21	5.70[2]	[2] В том числе и тепло на получение пара в рубашке.
Со ступенчатой решеткой	Сырой бурый уголь	2,4	53,1	2518	53,1	1,65	16,81	10,09	11,89[5]	6,46	
С вращающейся решеткой без швельшахты	Бурый уголь	18,3	31,0	3455	70,0	3.0	7,5	9,0	4,5	6,0[2]	[3] Включает и потерю с охлаждающей водой (0,5%).
С вращающейся решеткой и швельшахтой	Бурый уголь	17,83	21,94	4232	74,0	5,0	4,0	7,0	4,0	6,0[2]	
С чепцом Моргана	Брикеты бурого угля	10,5	14,5	5215	65	1	3	21	3	7[2]	[4] В том числе 3,2% с уносом.
С вращающейся решеткой	Камен. уголь	6,17	3,36	7458	73,18	9,94	2,54	4,48	0,94	8,92	
С вращающейся решеткой и механическим шуровочным приспособлением	»	10,42	3,11	6910	74,4	9,4	1,2	7,8	3,1	4,1	[5] При хорошем уходе может быть сокращено.
С вращающейся решеткой	»	9,8	4,5	6590	72.6	8,7	3,9	5,4	3,9	5,5[3]	
С вращающейся решеткой	Антрацит	6,84	5,80	7092	76,8	12,5	1,0	—	5,1[4]	4,6	
	Кокс	14,95	10,91	5933	84,18	8,25	3,37	—	2,11	2,09	

A^p — зольность рабочего топлива, W^p — влажность, $Q_в^p$ — высшая теплотворная способность рабочего топлива.

Таблица 46

Состав воздушного и смешанного газов из различных топлив при различных системах генераторов (в %)

Наименование газа	Обозначение	Дровяное топливо			Торф			Бурый уголь		Каменный уголь		Антрацит	Кокс
		Генератор с ненарушенной решеткой *	Генератор с ненарушенной решеткой	Генератор с вращающейся решеткой и шлюзбункером	Генератор с ненарушенной решеткой *	Генератор с ненарушенной решеткой	Генератор с вращающейся решеткой и шлюзбункером	Генератор с вращающейся решеткой без шлюзбункера	Генератор с вращающейся решеткой и шлюзбункером	Генератор с ненарушенной решеткой *	Генератор с вращающейся решеткой	Генератор с вращающейся решеткой	Генератор с вращающейся решеткой
Горючие составные части:													
Окись углерода	CO	29,5	28,0	30,0	28,5	28,7	28,3	23,5	27,0	21,5	25,0	29,0	30,0
Тяжелые углеводороды	$C_2H_4(C_mH_n)$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,1	0,1
Метан	CH_4	3,0	2,7	3,0	3,1	3,0	2,8	3,4	3,4	2,5	3,0	0,7	1,0
Водород	H_2	10,0	15,0	13,0	7,0	13,0	17,4	16,0	17,0	9,0	13,0	14,0	11,0
Негорючие составные части:													
Углекислота	CO_2	6,0	7,0	6,0	6,0	6,4	7,3	8,0	7,5	7,0	4,3	3,0	2,5
Кислород	O_2						от 0 до 0,3						
Азот	N_2	51,1	46,9	47,6	55,0	48,5	43,8	48,8	44,8	59,7	54,4	53,2	55,4

* Сухое дутье.

нератор. В период сбрасывания дров генератор сообщается с атмосферой. Если процесс загрузки происходит быстро, то особенных нарушений в процессе газификации не происходит, и давление вверху генератора на очень малый промежуток времени сравнивается с атмосферным; если же почему-либо, например вследствие застревания полена, клапан не закроется, то генератор остается на более продолжительное время в сообщении с атмосферой и или сильно газит или, поскольку потребляющие газ печи присасывают газ, внешний воздух может присосаться в генератор, с чем связана опасность сгорания газа или образования взрывчатой смеси и взрыва. Довольно часто применяли и применяют загрузочные коробки с одним затвором

Рис. 69. Загрузочная коробка для дров с одним клапаном

(рис. 93) в генераторах водяного газа. Загрузка при подобных коробках, являющихся плотными в закрытом виде, производится при выключенном дутье.

Коробки с двумя клапанами

Совершенствование загрузочных коробок привело к устройству двойного затвора. При этом загрузка топлива в коробку производится при открытом верхнем клапане и закрытом нижнем. Когда загрузочная коробка наполнена, закрывают верхний клапан, открывают нижний, и топливо ссыпается в генератор.

На рис. 70 представлена подобная прямоугольная коробка для дров. Верхний клапан состоит из крышки с водяным затвором. Нижний клапан состоит из одного или двух языков. Крышка и языки снабжены противовесами для облегчения поворачивания. В случае устройства нижнего клапана из двух языков (для более равномерного распределения топлива) рычаги языков связывают шарнирным устройством для одновременного поворота. Для создания в генераторе максимального слоя топлива, что весьма целесообразно при влажном топливе, нагружают генератор настолько высоко, что нижние языки остаются спущенными. Когда генератор несколько прогорит и удается повернуть и закрыть нижние языки, открывают верхнюю крышку и набрасывают на языки дрова. При этом нижний клапан разобщает генератор от атмосферы.

Коробки постоянно газят через втулки. Кроме того, так как нижние языки герметичности не дают и коробки сильно газят во время

Производительность генераторов

Таблица 47

по данным Газмонтажпроекта

№ по порядку	Шахта: диаметр (в м)	Шахта: площадь сечения (в м²)	Род топлива	Рекомендуемая производительность: газа (в м³/час)	Рекомендуемая производительность: топлива (в кг/час)	Возможный максимум: газа (в м³/час)	Возможный максимум: топлива (в кг/час)	Примечание
1	1,0	0,785	Антрацит	400	100	480	120	Не механизированный
			Газовые угли	320	96	385	110	
2	1,4	1,54	Антрацит	770	192	880	220	Не механизированный
			Газовые угли	675	193	750	215	
3	1,6	2,01	Антрацит	1000	250	1150	285	Не механизированный
			Газовые угли	875	250	1000	285	
4	2,0	3,14	Антрацит	1900	485	2200	550	Механизировано золоудаление
			Газовые угли	1600	465	1850	530	
5	2,2	3,81	Антрацит	2300	575	2700	675	Механизировано золоудаление
			Газовые угли	1800	515	2320	665	
6	2,6	5,30	Антрацит	3400	850	3700	925	
			Газовые угли	3700	1060	4650	1330	Механизированное золоудаление; для газовых углей механизирована шуровка топлива, топливоподача может быть как ручной, так и механизированной
			Челябинский уголь	2750	1375	3200	1600	
			Подмосковный уголь	2200	1465	2600	1735	
			Торф	3400	2125	4250	2660	
7	3,0	7,06	Антрацит	4500	1125	5000	1250	Механизированное золоудаление; для газовых углей механизирована шуровка топлива; топливоподача может быть как ручной, так и механизированной
			Газовые угли	5000	1430	6200	1770	
			Челябинский уголь	3700	1850	4250	2125	
			Подмосковный уголь	3000	2000	3400	2265	
			Торф	4500	2810	5650	3530	
8	3,6	10,20	Антрацит	5800	1450	7000	1750	Механизированное золоудаление; для газовых углей механизирована шуровка топлива; топливоподача может быть как ручной, так и механизированной
			Газовые угли	5600	1600	8600	2450	
			Челябинский уголь	5100	2550	5600	2800	
			Подмосковный уголь	4100	2730	4500	3000	
			Торф	6500	4080	8200	5125	

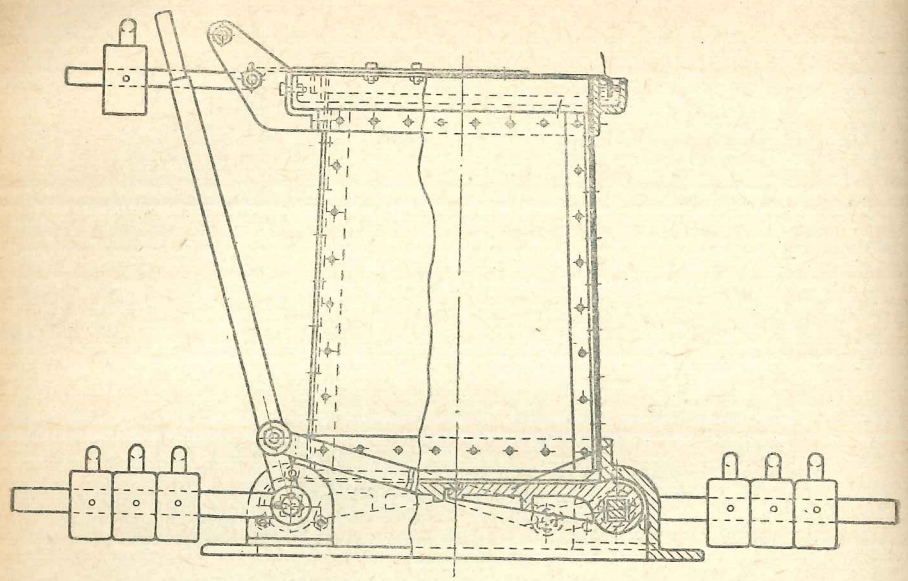


Рис. 70. Загрузочная коробка для дров с двумя клапанами

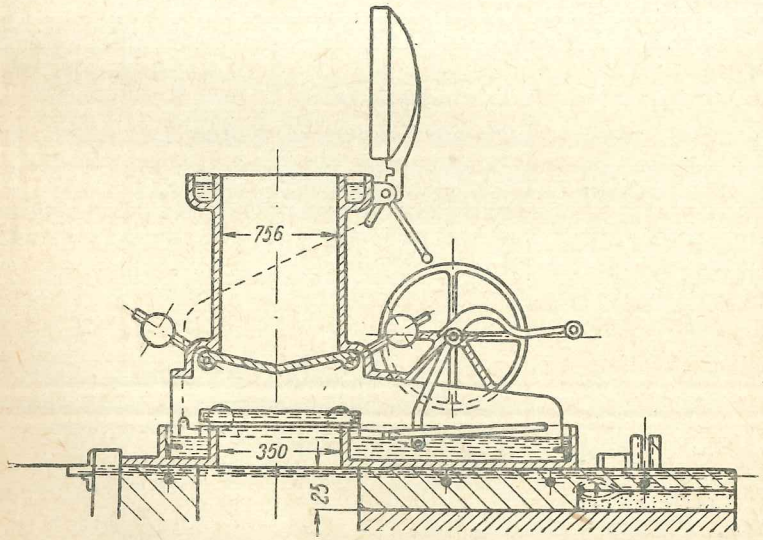


Рис. 71. Загрузочная коробка Смирнова с двойным гидравлическим затвором

забросы топлива, особенно если языки несколько покоробились, иногда применяют более совершенные коробки (правда, более сложные и дорогие) — с двойным гидравлическим затвором, в которых и нижний и верхний клапаны являются герметичными. Первоначально подобная конструкция была разработана Смирновым [126] и позднее несколько изменена другими конструкторами.

На рис. 71 представлена загрузочная коробка Смирнова. Нижний гидравлический затвор находится под языками, и при загрузке на языки дров он герметически выключает генератор. Перед открыванием языков и спуском дров закрывается верхняя крышка, поднимается рама, поддерживающая нижний затвор, и последний отводится в сторону. Таким образом один гидравлический затвор всегда выключает генератор.

При каждой загрузке выделяется объем генераторного газа, равный объему коробки.

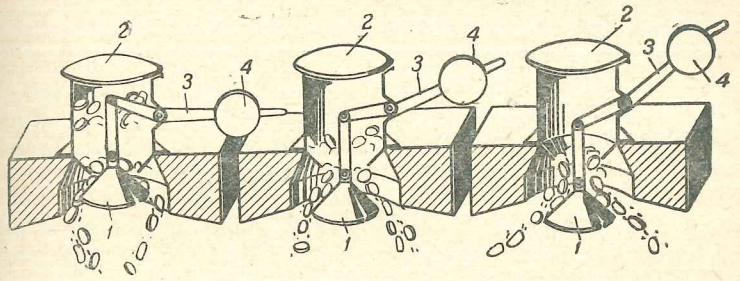


Рис. 72. Распределение топлива по сечению генератора в зависимости от положения конуса:

1—загрузочный конус, *2*—крышка, *3*—рычаг, *4*—противовес

Для засыпки кусковых топлив пользуются круглыми коробками. От пользования языками для уплотнения в них скоро отказались и перешли к применению конусов, дающих лучшую плотность.

На рис. 72 представлены коробки для кускового зернистого топлива. Нижний затвор осуществляется прижимаемым к коробке конусом, а верхний затвор создается прижимаемой к коробке крышкой. Крышка при засыпке топлива в коробку поднимается с помощью рычага вверх или отводится в сторону.

При загрузке топлива в генератор верхняя крышка закрыта, а конус с помощью рычага опускается вниз.

При газификации больших количеств топлива загрузочные коробки изготовляются большими и тяжелыми, подтягивание от руки конуса коробки становится трудным, и приходится уравновешивать эти конуса тяжелыми и громоздкими противовесами. Во избежание устройства громоздких рычагов с противовесами конуса подтягивают лебедками. Большие клапаны приводят в движение с помощью вспомогательной силы (обычно с помощью масла или воды, находящихся под давлением) (рис. 112).

Значение загрузочного конуса

Применение нижнего конуса имеет значение не только в отношении создания лучшей плотности загрузочной коробки. Он способствует также более равномерному распределению в генераторе топлива по размеру кусков, так как без него крупные куски откатываются к стенкам, где и получается наиболее легкий путь для газов. В зависимости от положения конуса топливо попадает в различные части генератора. На рис. 72 представлены три положения конуса. При небольшом опускании конуса топливо ссыпается преимущественно в середину; при дальнейшем опускании топливо все больше ссыпается к краям. Это создается совместным действием конуса и направляющего кольца (под коробкой), закладываемого в кладку. При малом опускании конуса крупные куски угля могут застревать между конусом и коробкой, уменьшая плотность загрузочного аппарата.

Лучшее регулирование засыпки достигается применением двух конусов, из которых внешний — кольцевой — охватывает внутренний. При этом возможны два положения — расположение внутреннего конуса ниже и расположение внутреннего конуса выше внешнего. Если внутренний конус расположен ниже внешнего, то при его опускании содержимое коробки засыпается преимущественно ближе к середине генератора, а остаток топлива может быть засыпан у краев генератора.

Обратное распределение топлива, т. е. подача главной массы топлива у стен и остатка к середине, может быть достигнуто путем опускания обоих конусов одновременно и последующим подъемом внешнего конуса.

При этом устройстве на самую середину генератора топливо почти не попадает, что не имеет особого значения при очень малом диаметре внутреннего конуса или устройстве нижнего направляющего кольца.

Если внутренний конус расположен сверху, а внешний — снизу, может быть достигнуто еще лучшее распределение топлива, что имеет большое значение при несортированном угле с неоднородным размером кусков топлива. Для того чтобы внутренний конус можно было поднять при заполненной коробке, он снабжен цилиндрическим щитком. Оба конуса могут передвигаться самостоятельно и в любой последовательности, и этим устройством могут быть достигнуты хорошее выравнивание и распределение засыпки.

Размеры конуса и коробки должны соответствовать роду и размеру топлива и не должны быть слишком малыми. Направляющее кольцо подвержено износу от действия жара.

Рычаг, на котором висит конус, при опускании конуса описывает дугу, вследствие чего при опускании имеет место отклонение конуса от оси, что влияет на распределение топлива. Чтобы избежать этого перекоса, иногда соединяют конус с рычагом не жесткой серьгой, а цепью с сегментом (рис. 75), или же делают специальные направляющие для конуса.

Автоматические непрерывные питатели

Режим генератора меняется в зависимости от периодичности загрузки топлива. После засыпки топлива, особенно содержащего большое количество влаги и летучих, сначала сильно повышается влажность газа, потом газ обогащается летучими. Температура газа при этом падает. После этого увеличивается в газе количество окиси углерода и уменьшается количество летучих; температура газа повышается. Перед загрузкой генератор прогорает, в нем увеличивается содержание углекислоты, и температура его еще больше повышается. Таким образом генератор не имеет постоянного режима — непрерывно меняются температура, состав и теплотворная способность газа, что не отражается на потребителе газа лишь в случае наличия большого числа генераторов и смешения их газа. Кроме того при неплотности загрузочных устройств и выделении газа вследствие тяжелых условий работы для газовщиков ручная засыпка топлива происходит особенно неаккуратно.

Стремление иметь равномерный, постоянный режим генератора и облегчить условия работы обслуживающего персонала привели к применению автоматических непрерывных питателей.

1. Питатель Вельмана. Из существующих и работающих в СССР следует отметить автоматический питатель Вельмана, установленный на механических генераторах Вельмана на нескольких стекольных и цинковых заводах (Константиновка). Этот аппарат (рис. 81) состоит из двух барабанов с лопастями. Верхний барабан, имеющий четыре лопасти, регулирует количество засыпаемого угля. Нижний пятилопастный барабан служит затвором, засыпающим уже отмеренное количество угля. От бункера питатель отделяется задвижкой. Барабаны приводятся в движение посредством собачек и храповых колес. Периодически — через малые промежутки времени, практически — непрерывно, оба барабана поворачиваются на некоторый угол; при этом уголь ссыпается. Над нижним барабаном подвешена заслонка, снабженная противовесом, которая предохраняет карманы барабана от переполнения углем. Угол поворота нижнего барабана постоянен, угол же поворота верхнего барабана можно изменять, тем самым изменяя количество засыпаемого угля (дозировка). Кожух имеет отверстия для осмотра и удаления посторонних тел. Для смачивания нижнего клапанного барабана в питатель подается небольшое количество воды.

Эти приспособления дают лишь непрерывное автоматическое питание. Равномерность распределения топлива по сечению достигается в этих генераторах комбинированным движением шахты генератора и шуровочного лома (см. ниже).

В настоящее время за границей эти питатели значительно видоизменены. Новые питатели (рис. 73) снабжены двумя конусами, которые попеременно поднимаются и опускаются, засыпая топливо в газогенератор. Когда один из конусов открыт, другой закрыт, что обеспечивает хорошую плотность. Конуса и их седла выполнены из специальной стали и обработаны для плотного прилегания поверхности конуса к круглому седлу.

Это позволяет сохранить газонепроницаемость даже при разработке этих частей.

Верхний барабан дозирует количество подаваемого топлива. Число оборотов его может изменяться.

Задвижка для отделения от бункера при осмотре и смене частей сохранена и в этой конструкции. Питатели строятся двух размеров: на 2,2 и 4,5 *т/час*. Эти питатели помимо лучшей плотности обеспечивают также хорошее распределение топлива по сечению.

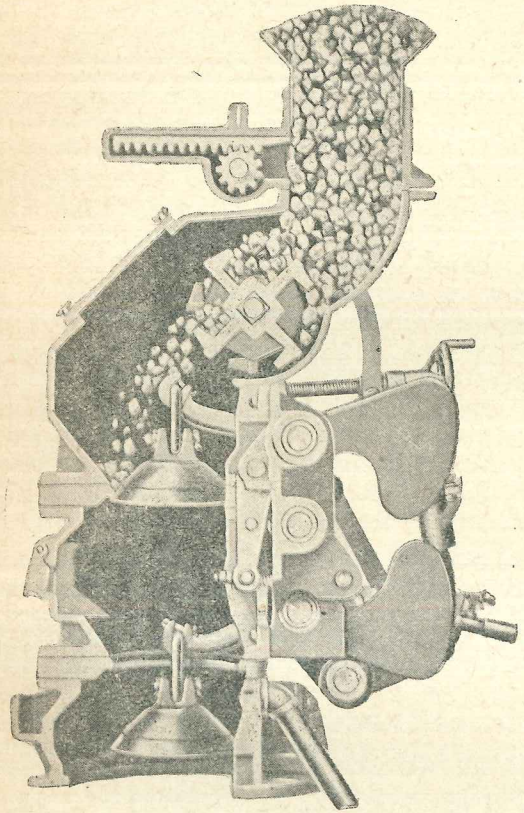


Рис. 73. Автоматический питатель Вельмана

2. Питатель Чапмана. На рис. 83 представлен аппарат для автоматической загрузки системы Чапмана. Аппарат работает следующим образом. Из трубы, связанной с бункером, уголь поступает в воронку, а из последней — во вращающийся барабан, разделенный перегородками на четыре отсека. Барабан имеет слегка коническую форму (уклон — 2%), что позволяет подтягивать его для плотности. Барабан вращается с помощью храпового механизма. Для генератора диаметром в 3,35 *м* пределы регулирования подачи топлива — 0—4 *т/час* при 8 промежуточных положениях.

Во избежание поломок механизма питателя при попадании в него кусков породы, больших кусков угля и металлических предметов собачка укреплена на легко срезаемой шпонке.

Уголь подается из барабана по направляющей плоскости. На пути угля расположены три скребка, могущих изменять направление угля и регулируемых газовщиком. Равномерность распределения угля по сечению генератора достигается охлаждаемым водой распределительным конусом, расположенным в центре генератора. Барабан не только дозирует уголь и служит затвором, но и дробит слишком крупные куски угля, раздавливая их между кромкой перегородки и стальной отливкой, прикрепленной к воронке. Для попадания угля в середину генератора конус снабжен вырезами. Специальный скребок очищает конус от смолы.

Движение барабану передается качающимся кривошипом, снабженным храповиком. Весь механизм приводится в движение от мотора в 2 л. с. с помощью системы зубчатых колес и шатуна. Этот же мотор приводит в движение и червячную передачу для вращения автоматического шуровочного приспособления (см. ниже).

Требуемая мощность для работы питателя составляет около 0,5 *квт* и для работы автоматического шуровочного приспособления — около 1 *квт*.

В подобном же автоматическом питателе Пауэр-Газ ось также отклонена от вертикали (во избежание нагрузки на питатель). Питатель

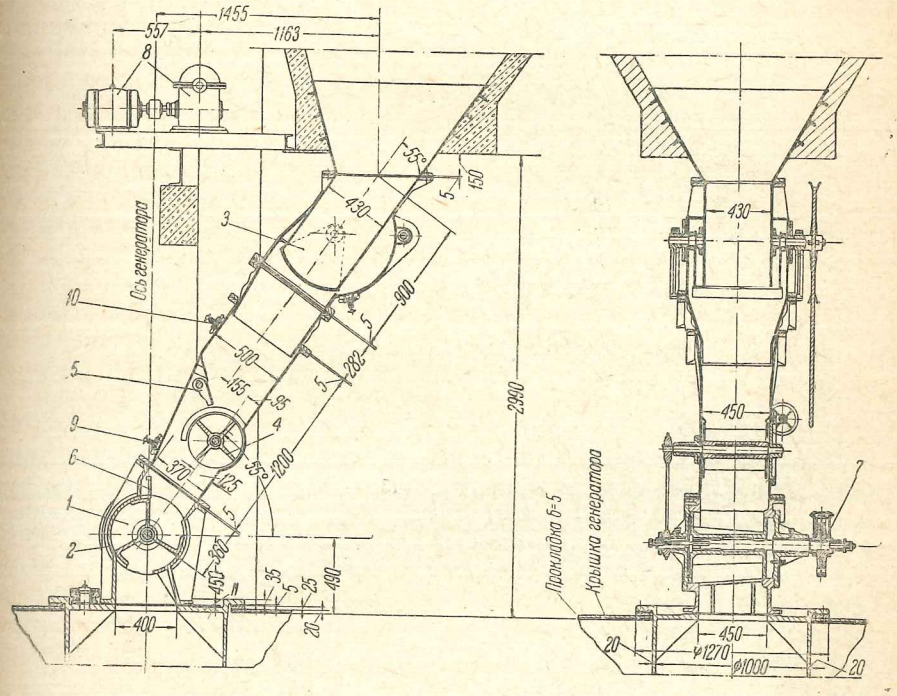


Рис. 74. Автоматический питатель Газогенераторстроя

снабжен распределительным конусом, устанавливаемым по желанию и охлаждаемым водой.

Число карманов в барабанах может быть различное.

При увеличении числа карманов улучшается плотность, но увеличиваются дробление и опасность застревания угля.

3. Питатель Газогенераторстроя. На рис. 74 показан автоматический питатель Газогенераторстроя. Он состоит из трехсекционного конусного порционера *1*, вращающегося в чугунном корпусе *2*. Топливо из бункера проходит через секторный затвор *3* в порционер, причем дозирующей крыльчаткой *4* отмериваются определенные порции топлива, чтобы не допустить переполнения секции порционера и устранить дробление угля кромками его о край корпуса. Для

16* 212/1

устранения защемления топлива у крыльчатки и порционера имеются качающиеся предохранительные пластинки *5* и *6* с противовесами.

Вращение порционера производится храповым приводом *7*, соединенным тягой с мотором и редуктором *8*.

Регулировка производительности достигается изменением зацепления храповика на 1, 2 или 3 зуба путем перестановки ползуна тяги по плечу качающегося рычага, а также изменением числа оборотов дозирующей крыльчатки *4*, соединенной цепной передачей с валом порционера.

Для осмотра внутренности питателя на корпусе его имеются дверцы *9* и *10*. Для создания одинаковых условий для распределения топлива в шахте генератора питатель устанавливается на чугунной крышке *11*, имеющей снизу чугунную юбку, определяющую постоянный уровень топлива.

Достоинством этого питателя являются простота его конструкции и плотность. Коническая форма порционера обеспечивает плотное прилегание порционера к корпусу даже при наличии износа. Вследствие герметичности соединения приемного отверстия питателя с основным бункером газ, заполняющий опорожненные карманы, отводится не в рабочее помещение, а в бункеры.

Приспособления для поддержания постоянного уровня слоя топлива, равномерного распределения топлива и предупреждения уноса пыли

Поддержание постоянного уровня слоя топлива, равномерное распределение топлива по сечению и предупреждение уноса пыли при питании приобрели особенное значение при использовании в газогенераторах мелких топлив и с неравномерным размером кусков, при которых влияние неравномерности проявляется резко и возможен большой унос пыли. В значительной мере к этому побудило также применение генераторов большого диаметра, обслуживание которых требует более совершенных устройств.

К числу приспособлений, позволяющих избежать при загрузке пыления и поддерживающих постоянный уровень топлива, относятся трубы или малые бункеры, расположенные в газогенераторе (рис. 84, 87 и 88).

При достаточно равномерном размере кусков подобные трубы-цилиндры вполне удовлетворяют своему назначению: они поддерживают слой топлива постоянным и препятствуют уносу с газом пыли, вздымающейся при падении загружаемого топлива.

При неравномерном размере кусков в высоких трубах происходит сепарация топлива по размеру кусков, причем мелкий уголь оказывается преимущественно в середине слоя.

Применением для загрузки топлива нескольких труб небольшого диаметра возможно осуществить равномерное распределение мелкого топлива по сечению при отсутствии значительных колебаний высоты слоя в генераторах большого диаметра.

На рис. 114 представлен генератор системы Вельмана — Галуша, имеющий диаметр до 4,5 *м*. Такая же загрузка с помощью отдельных

труб или рукавов может быть применена в кольцевых генераторах (рис. 113) взамен движущейся по кольцу воронки.

Снабжение труб топливом обеспечивается во многих конструкциях специальными поплавками или пластинками, отклоняющимися при засыпке топлива в трубы. Так в случае регулятора в виде пластинки при опорожнении трубы рычаг с противовесом поднимает пластинку, включающую пусковой контакт питателя. В генераторах Вельмана — Галуша непрерывная подача топлива в трубы обеспечивается запасом топлива в бункере.

Равномерное распределение топлива по сечению генератора при мелком и неравномерном размере кусков, при одновременном поддержании постоянного уровня слоя и отсутствии пыления, связанного с загрузкой топлива, может быть до известной степени достигнуто соответственным комбинированием автоматического шуровочного приспособления — мешалки типа Чапмана—с загрузочной трубой.

Попытка установить в генераторах над граблями трубы и направляющие крылья не увенчалась успехом ввиду сепарации топлива в трубе и за нею и попадания мелочи преимущественно в середину слоя. Во избежание этого устанавливают по оси трубы конус (рис. 84).

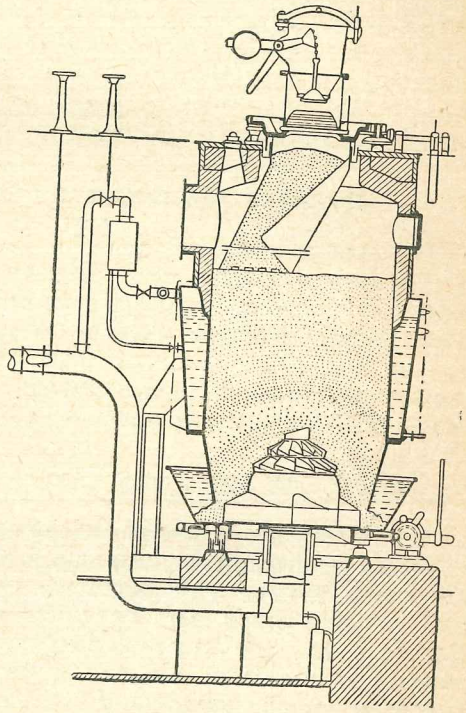


Рис. 75. Генератор с жолобом, выравнивающим слой топлива

Лучшие результаты дает применение специальных распределителей, двигающихся вместе с мешалкой и содействующих равномерной подаче топлива к стенкам и разравниванию слоя (рис. 160). Отводы для топлива от трубы к распределителям расположены тангенциально. Это устройство все же полностью не устраняет сепарации топлива. Повидимому спекание мелкого топлива в распределителях способствует равномерности распределения.

Во избежание пыления, происходящего при падении топлива в генератор, и для равномерного распределения топлива питатели иногда снабжают вращающимися наклонными желобами, подающими топливо к самому слою. Питание жолоба происходит через вращающуюся вместе с жолобом трубу. В одной из конструкций (Петер) имеется узкий жолоб, движущийся спиралеобразно через все точки поперечного сечения шахты. На рис. 75 показан генератор с жолобом, доходящим до верхней поверхности топлива и выравнивающим ее.

Во избежание сепарации мелких топлив по размеру кусков фирма «Копперс» применяет специальные распределители (рис. 160). Распределительное устройство состоит из вращающегося цилиндра, подвешенного на роликах, оканчивающегося желобами, распределяющими топливо по поверхности, причем таким образом, чтобы у стен топливо лежало несколько более высоким слоем, чем в середине. По данным фирмы, это устройство позволило газифицировать без затруднений сравнительно неравномерное по размеру кусков топливо, например кокс с размером кусков в 0—30 *мм* и с содержанием 50% мелочи и пыли размером менее 10 *мм* [127].

Загрузку при использовании топлив с неравномерным размером кусков можно вести слоями. Для этого предлагали загрузочное устройство, из которого топливо различного размера выгружалось слоями распределительным устройством по типу рис. 160.

Питатели для топлив с кусками больших размеров

Несколько отличной должна быть конструкция автоматических питателей для топлив, состоящих из недробящихся кусков большого размера, например для торфяных брикетов или дров. В этом случае могут быть применены загрузочные устройства, снабженные конусами или иной формы клапанами, попеременно опускающимися и поднимающимися (или открывающимися и закрывающимися) и приводимыми в движение автоматически.

Предупреждение пропуска газа загрузочными приспособлениями

Одним из недостатков описанных загрузочных приспособлений является пропускание ими газов в объеме, по крайней мере соответствующем объему уплотняющего барабана. Неплотности барабана или клапана могут быть причиной еще большего проникания газов. Борьба с выделением газов может итти путем отвода этого газа вытяжкой из питателя, а также путем максимального уплотнения клапанов и частей питателя с помощью уплотняющих пружинящих планок, подтягиваемых конических барабанов и т. п.

Хорошим, но дорогим способом борьбы с выделением газа является присоединение питателя к промежуточным бункерам.

Иногда верхний затвор в обычных коробках делают для плотности водяным. Вместо верхней крышки также можно применить конус, что позволяет засыпать топливо в коробку при двух закрытых клапанах и сбрасывать топливо с верхнего на нижний клапан в малый промежуток времени, а следовательно уменьшать сравнительно с обычным выделение газа через неплотности коробки.

В самых плотных коробках неизбежно просачивание газа в помещение загрузки при открывании верхнего клапана, так как при спуске топлива в шахту коробка заполняется газом. Часто для вытеснения газа в шахту или предупреждения попадания газа в коробку подводят к загрузочным коробкам пар в двух местах — под конус и в самую коробку. Во время загрузки топлива из бункера в коробку, т. е. когда верхний затвор открыт, пар пускают под конус,

и он предупреждает выбивание газа из генератора в коробку. После заполнения коробки топливом и закрытия верхнего клапана выключают подачу пара под конус и пускают пар в коробку. Пар заполняет коробку и при опускании конуса предупреждает выделение в нее газа.

Питатели генераторов водяного газа

В питателях генераторов для получения водяного газа, работающих в условиях повышенного давления газа, особенное значение имеет плотность. Питатели с вращающимися порционерами по типу, представленному на рис. 74, применяемые в генераторах для получения смешанного газа, в генераторах для получения водяного газа не применяются вследствие их недостаточной плотности.

На рис. 76 представлен один из наиболее рациональных питателей для генераторов водяного газа. Плотность этого питателя обеспечивается применением промежуточного бункера *4* значительной емкости, снабженного в верхней и нижней горловинах надежными в смысле герметичности задвижкой *3** и клапаном *5*.

Питание генератора производится топливом из промежуточного бункера *4* через открытый клапан *5* при закрытой задвижке *3*.

Наполнение промежуточного бункера производится при закрытом клапане *5*, отключающем генератор, и при открытых задвижке *3* и задвижке *2* основного бункера *1*.

Управление переключением этих задвижек централизовано. Порядок открытия и закрытия задвижек обеспечивается блокировкой, показанной на рис. 77.

Порядок открытия и закрытия всех трех клапанов должен быть следующим.

При загрузке промежуточного бункера (мерника) закрывается клапан *5* для отключения генератора, затем открывается задвижка *3* и после нее — задвижка *2*. Задвижка *2* открывается последней, чтобы устранить возможность просыпания топлива из основного бункера *1* в том случае, если задвижка *3* была бы закрытой.

При питании генератора сначала закрывается задвижка *2*, отсекающая поступление топлива из основного бункера, затем закрывается задвижка *3*, изолирующая промежуточный бункер от окружающего пространства, и открывается клапан *5*, пропускающий топливо через нижнюю часть питателя в генератор.

Для осуществления указанного порядка взаимодействия задвижек имеются две группы блокировок. Первая группа — взаимная гидравлическая связь задвижек *2* и *3*, вторая группа — механическая блокировка первой группы с клапаном *5*.

Устройство и взаимодействие всей системы следующие. На пульте управления расположены два четырехходовых крана — *6* и *7*. Кран *6* управляет клапаном *5*, кран *7* управляет обоими задвижками.

На шпиндели четырехходовых кранов надеты маховички *8* и *9*, сблокированные между собой системой сегментных вырезов, ставящих управление одного клапана в зависимость от положения другого.

---

* Обозначения *1*, *2* и *3* см. на рис. 77.

При положении, указанном на рисунке, кран *6* может быть открыт лишь после поворота маховичка крана *7* на 180°.

Таким образом обеспечивается отключение генератора от окружающего пространства, так как все три клапана одновременно быть открытыми не могут.

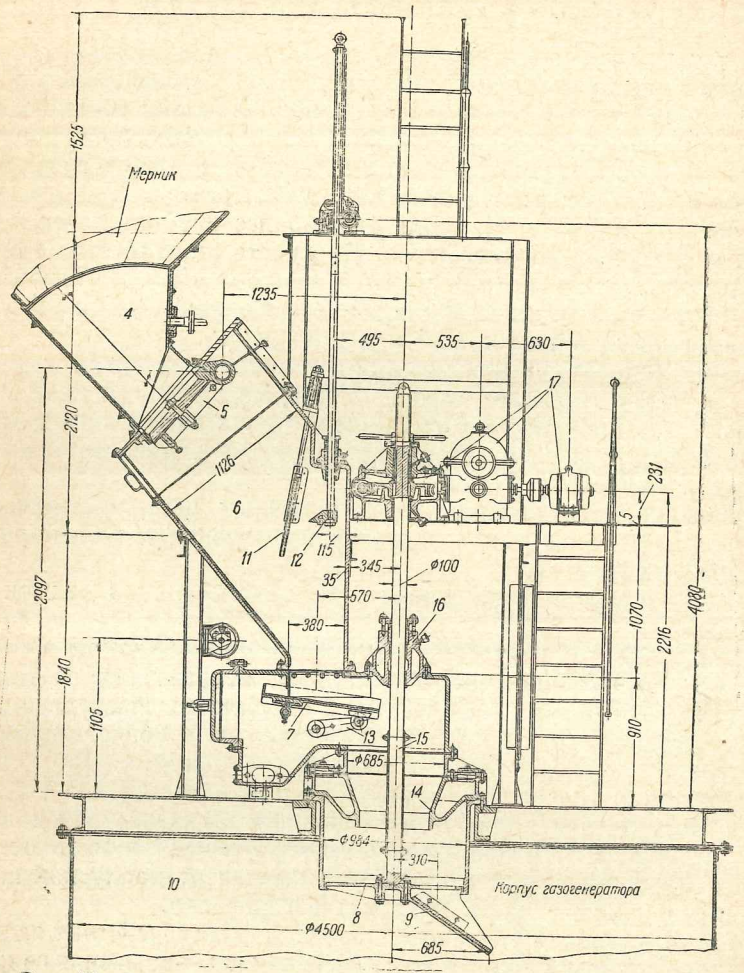


Рис. 76. Автоматический питатель генератора водяного газа

Для осуществления указанной последовательности в работе верхних задвижек *2* и *3* цилиндры гидроприводов *10* и *11* снабжены дополнительными золотниками *12* и *13*, передающими гидравлический напор от одного цилиндра к другому лишь после того, как первый закончил свой ход.

Перестановка штоков золотников производится при помощи кулачковых колец *14*, установленных на вспомогательных штоках, двигающихся совместно с основными штоками гидроприводов.

На рис. 77 показано положение, когда кулачковое кольцо *14*, надетое на вспомогательный шток *15* гидропривода *11*, передвинуло шток *16* золотника *12* в левое положение, благодаря чему гидравли-

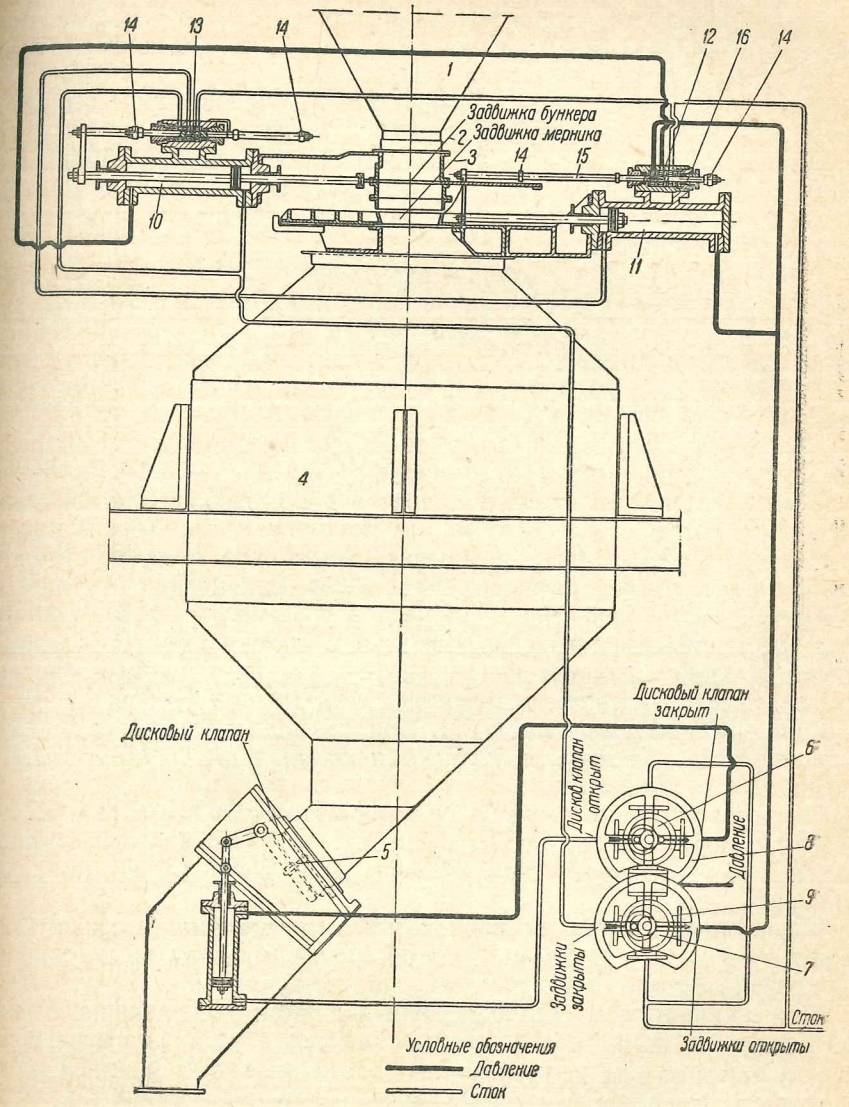


Рис. 77. Схема управления работой автоматического питателя

ческий напор по коммуникации, показанной сплошной линией, перешел к гидроприводу *10* и открыл вторую задвижку.

Закрытие задвижек происходит в обратном порядке, который нетрудно проследить по схеме.

Конструкция нижней части питателя представлена на рис. 76. Топливо из промежуточного бункера *4* через открытый клапан *5* поступает в приемную камеру *6*. В этой камере имеются регулирующая заслонка *11* и щуп *12*.

Через нижнее отверстие приемной камеры топливо поступает на подающую плиту *7*, которая имеет колебательное движение. Наклон этой плиты может изменяться рычагом *13*.

С подающей плиты топливо падает вниз, на вращающуюся плиту *8*, через охлаждаемую водой горловину *14*. Плита *8* укреплена на штоке *15*, проходящем через охлаждаемый водой вертикальный подшипник *16*. Вращение штока производится электроприводом *17*. Плита *8* имеет жолоб *9*, распределяющий топливо по поверхности слоя в генераторе *10*.

Для водяного газа применяются также питатели, действующие один раз в цикл. Они дешевле и компактнее описанного выше, но они менее обеспечивают равномерность режима, плотность их также менее удовлетворительна. Подобные питатели, применяемые в больших установках, управляются автоматами, регулирующими цикл получения водяного газа.

На рис. 78 представлен питатель Говарда. Он представляет собой камеру, снабженную в нижней части распределительным клапаном-конусом для подачи топлива в генератор и для разобщения от генератора и в верхней части — откидным клапаном, отделяющим камеру от боковой вспомогательной камеры, в которую попадает топливо или непосредственно из бункера или с весов. Вспомогательная камера в верхней части снабжена клапаном, разобщающим ее от бункера. При закрытом нижнем распределительном клапане питателя открывается верхний клапан и затем клапан бункера. Топливо заполняет камеру питателя, после чего закрывается клапан бункера и затем верхний клапан камеры питателя. При закрытых клапанах бункера и вспомогательной камеры опускается колокол питателя, и топливо засыпается в генератор.

Периоды загрузки угля рассчитаны таким образом, что они совпадают с периодами дутья пара сверху, вследствие чего не происходит потери водяного газа. В период парового дутья снизу все клапаны закрыты.

Управление клапанами происходит автоматически через систему золотников и гидравлических цилиндров, штоки которых связаны с гидравлическими магистралями давления и стока.

При наличии весов у бункера они являются одновременно и взвешивающим и дозирующим приспособлением и устанавливаются под течкой бункера. Весы представляют собой железный ящик емкостью в 0,25 $м^3$, опирающийся на коромысло с подвижным противовесом. Весы снабжаются клапаном, отделяющим их от вспомогательной камеры. Работа клапанов в этом случае протекает в следующей последовательности:

1) открывается секторный затвор у бункера, и топливо заполняет весы до тех пор, пока коромысло не поднимется кверху;

2) коромысло воздействует на гидравлический цилиндр затвора бункера, и он закрывается;

3) одновременно с закрытием затвора бункера автоматически производится регистрация веса;

4) открывается нижний клапан весов, и топливо попадает через вспомогательную камеру в питатель;

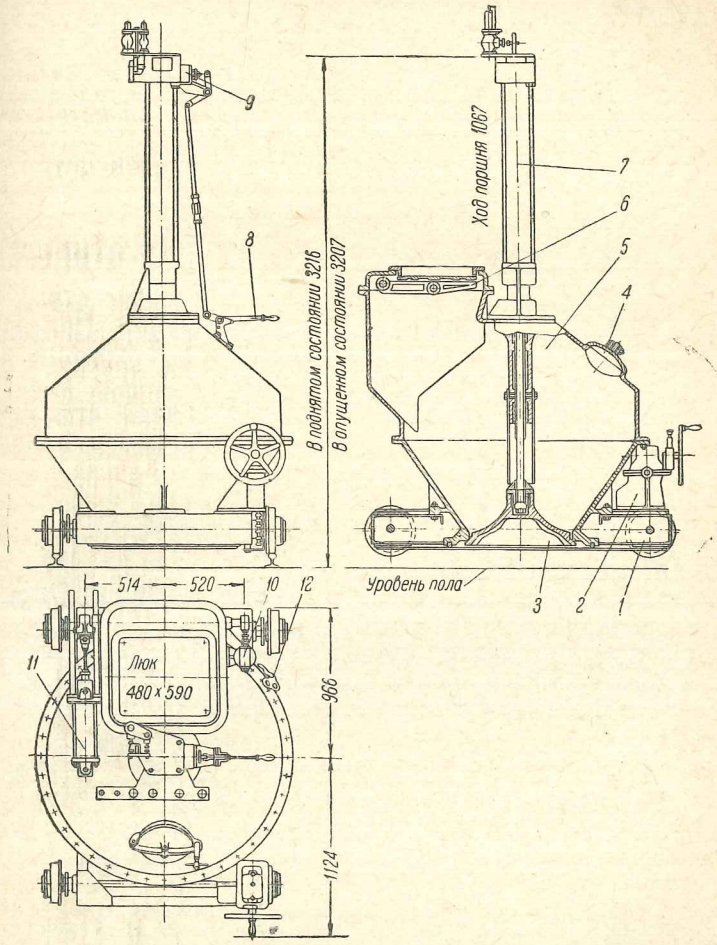


Рис. 78. Автоматический питатель Говарда:

1—рама, *2*—подъемный механизм рамы, *3*—распределительный конус, *4*—лаз, *5*—корпус питателя, *6*—дисковый клапан, *7*—гидропривод распределительного конуса, *8*—ручка подъемного механизма распределительного конуса, *9*—гидропривод подъемного механизма распределительного конуса, *10*—предохранительный блок, *11*—гидропривод дискового клапана, *12*—смотровой лючек

5) закрываются клапан весов и верхний клапан питателя;

6) опускается распределительный конус питателя.

Для удобства ремонта и монтажа питатель Говарда лежит на железной раме и может быть поднят и отведен по рельсам в сторону.

Для плотности между питателем и горловиной генератора прокладывают асбестовый шнур.

Иногда во избежание излишнего разогрева частей питателей они снабжаются водяным охлаждением.

5. ЗАТВОРЫ СМОТРОВЫХ И ШУРОВОЧНЫХ ОТВЕРСТИЙ

Для осмотра поверхности топлива в генераторе, замера зон и шуровки служат смотровые и шуровочные отверстия. При дровяном топливе (поленья) эти отверстия иногда делают в своде, но только для определения щупом уровня загрузки. При других топливах, особенно при сильно шлакующихся и спекающихся, отверстия приходится располагать в значительном количестве в своде или крышке генератора и в боковых стенках, чтобы возможно было шуровать любое место в генераторе. Эти отверстия делаются не слишком больших размеров для избежания сильного выделения газов, но достаточными, чтобы в них мог быть пропущен железный лом диаметром в 30—35 *мм*. Огнеупорная кладка вокруг отверстий должна быть скошена, чтобы ломом можно было коснуться края поверхности топлива, не повреждая кладки.

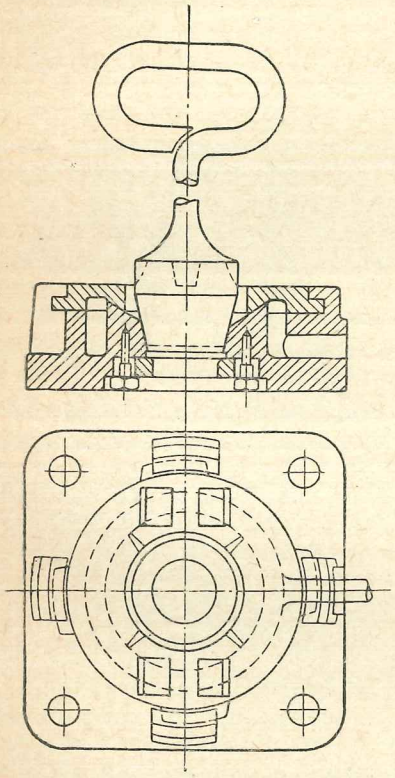


Рис. 79. Шуровочный затвор с паровой завесой

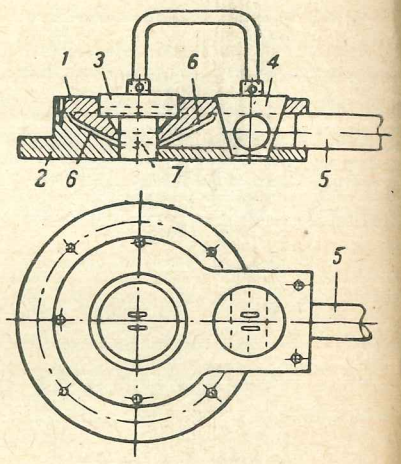


Рис. 80. Затвор системы Шпецлера

Над отверстиями крепится чугунная арматура, расточенная по конической или шаровой поверхности; отверстия в арматуре прикрываются коническими или шаровыми пробками.

При шуровке топлива из шуровочных отверстий вырывается струя генераторного газа, что создает тяжелые условия обслуживания генератора, а иногда влечет отравления рабочих. Особенно сильно выбивание газа при значительном положительном давлении у мест расположения шуровочных окон.

Мерами борьбы с выбиванием газа являются:

1) уменьшение ручной шуровки, что достигается применением автоматических шуровочных приспособлений и

2) устройство шуровочных затворов, в которых струя газа перебивается струей сжатого пара или воздуха.

На рис. 79 изображен паровой затвор. Он представляет собой чугунную коробку, укрепленную над шуровочным отверстием. В коробке имеется узкий кольцевой канал для пара, сообщающийся несколькими канальцами с отверстием. При выемке пробки, закрывающей шуровочное отверстие, и открытии парового вентиля пар с давлением в 1—2 *ат* поступает с большой скоростью в шуровочное отверстие и образует завесу, препятствующую выходу газа.

Затворы генератора снабжаются паром от кольцевого паропровода.

Недостатками паровых затворов являются конденсация в паропроводах пара и быстрая порча мест уплотнения.

Иногда применяют воздушные затворы. В этом случае подается воздух, сжатый до 200—400 *мм* вод. ст.

На рис. 80 представлен затвор системы Шпецлера. Он состоит из двух частей *1* и *2* с двумя отверстиями, прикрытыми пробками *3* и *4*. Пробка *4* отключает воздухопровод *5* и при повороте на 90° включает его. Между частями *1* и *2* имеется полое пространство *6*, открывающееся в смотровое отверстие узкой сплошной щелью. При подъеме пробки *3* и отведении ее на 90° пробка *4* поворачивается, и воздух устремляется в пространство *6* и смотровое отверстие *7* и препятствует выходу газа из генератора, не попадая вместе с тем в генератор или попадая в него лишь в небольшом количестве. Для последней цели давление воздуха регулируется специальным вентилем.

Недостатком воздушных затворов является образование пламени внутри генератора, что препятствует осмотру внутренности генератора. Кроме того при очень смолистых топливах давления воздуха недостаточно для предотвращения засмоления отверстий.

6. МЕХАНИЧЕСКИЕ ШУРОВОЧНЫЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ

Устройство и преимущества

Одной из самых тягостных работ на газогенераторах является ручная шуровка, которая имеет целью создание благоприятных условий для равномерного распределения газов, а именно—устранение прогаров, разбивание комьев спекшегося топлива и шлака и разравнивание слоя топлива.

При шуровке рабочий ворошит топливо ломом, разбивает комья шлака и топлива и разравнивает слой преимущественно через отверстия в своде или крышке генератора. При этом из генератора вырывается струя газа, отравляющая рабочего и препятствующая добро-

качественной работе. Для предупреждения выбивания газа применяют паровые или воздушные затворы, которые однако не всегда исправно работают, а кроме того и в этом случае остается зависимость работы генератора от внимательности, уменья и надзора газовщика. Ручная шуровка имеет также недостаток периодичности и в результате этого — периодического изменения характера работы генератора. Дробление шлаков осуществляется до известной степени применением соответствующих конструкций решеток, эксцентричных или снабженных выступами. Дробление шлака осуществляется также описанными ниже приспособлениями, состоящими из штанги, проходящей через отверстие в своде, с электрическим, механическим или пневматическим приводом. Что же касается разрушения спекшихся кусков топлива, удаления прогаров и разравнивания слоя топлива, то и для этой цели имеются хорошие и надежные конструкции, уменьшающие в большей или меньшей степени тяжелый ручной труд, а также дающие возможность иметь более равномерную работу генератора.

Для этой цели применяют движение в слое топлива специальных, охлаждающихся водой, приспособлений: ломов — в генераторе Вельмана (рис. 81), мешалок — в конструкции Чапмана (рис. 83) и гребков — в генераторе Моргана (рис. 85), а также указанных выше штанг.

В качестве приспособления, разравнивающего и шурующего топливо, применяется также вращающаяся шахта генератора, обычно в комбинации с одним из вышеприведенных шуровочных приспособлений. Полной замены ручной шуровки избежать при помощи механических приспособлений затруднительно, так как в этом случае выполняется ряд различных операций, и поэтому работа механизмов контролируется и дополняется ручным обслуживанием.

Применение автоматических шуровочных приспособлений дает возможность намного увеличивать производительность генераторов сравнительно с обычным и обеспечивает хорошую и равномерную работу.

Генераторы с автоматическими загрузкой и удалением шлака и механическим шуровочным приспособлением называют м е х а н и ч е с к и м и.

Преимущественно эти генераторы используются для каменных углей, обладающих способностью спекаться. Иногда их применяют и для других топлив — прочных и не распадающихся при нагревании, что имеет целью разравнивание слоя и более равномерное распределение топлива по сечению генератора, особенно в случае большого диаметра его.

Как указывает В. Виндет [109] на основании практики работы генераторов в США, в генераторах с ручным обслуживанием высота слоя каменного угля составляет от 1100 до 2100 *мм*, а в генераторах механических — от 400 до 750 *мм*, причем интенсивность газификации возрастает от 40—75 *кг/м² час* при ручном обслуживании до 250—500 *кг/м² час* при полностью механизированном.

В результате большой производительности механизированных генераторов увеличивается количество кислорода, поступающего к поверхности углерода, и повышается скорость процесса газификации.

Увеличение сопротивления при равномерном распределении топлива улучшает распределение газов по сечению. Чрезмерного повышения давления не происходит ввиду малой высоты слоя топлива.

Благодаря трению, возникающему между кусками топлива и между топливом и обмуровкой, зола, образующаяся на поверхности кусков угля, удаляется, обнажая свежую поверхность для быстрой газификации, причем трение о кирпичную кладку устраняет приваривание золы и шлака. Благодаря непрерывной шуровке предупреждается образование прогаров и избегается сгорание CO в CO_2. При прочном топливе эти генераторы целесообразно применять не только для спекающихся топлив, образующих сплошную, непроницаемую для газов массу, но и для других.

Шуровочный лом Вельмана

На рис. 81 представлено устройство механического шуровочного приспособления в генераторах Вельмана, состоящее из комбинации шуровочного лома и вращающейся шахты.

Вращающаяся шахта *6* состоит из железного кожуха, футерованного шамотным кирпичом и снабженного для приведения во вращение шахты зубчатым венцом *18*. К венцу прикреплен рельс *19*, катящийся по роликам, закрепленным на кронштейнах опорных колонн. К конической части кожуха прикреплены подрезные ножи и скребки *13*, дробящие шлак. Крышка *17* генератора стальная. С кожухом она соединяется с помощью водяного затвора *7*. Цифрой *5* обозначен расположенный эксцентрично шуровочный лом. Этот лом (рис. 82) охлаждается водой и движется взад и вперед, разрушая спекшиеся комья и разравнивая слой топлива. Он приводится в движение с помощью зубчатого сегмента, в свою очередь приводимого в действие посредством вала и кривошипа от мотора *16* (рис. 81). От этого же мотора приводится во вращение шахта. Наконечник шуровочного лома с течением времени срабатывается; поэтому он делается съемным и насаживается на основной корпус лома. Частицы угля перемещаются под действием комбинированного движения шуровочного лома и шахты.

При вращении шахты частицы топлива увлекаются благодаря силе трения. Этому увлечению препятствует сила тяжести, и в середине генератора при его большом диаметре топливо неподвижно. Вращающиеся шахты книзу суживают — повидимому в целях увеличения подвижности слоя топлива в средней части.

Вращающаяся на шаровой опоре чаша не имеет специального приводного механизма и увлекается трением о слой шлака, вращающегося вместе с шахтой. С помощью ручного привода чаша останавливается специальным механизмом, и происходит ломка шлака скребками и выдавливание его в чашу.

Прерывистое движение чаши влечет за собой разрыхление золы и сохранение ее пористости, улучшающее распределение дутья.

Как указано выше, генераторы Вельмана снабжаются в настоящее время питателями с коническими клапанами.

Генераторы Вельмана выпускаются трех размеров: диаметром в 2,43 *м* с мотором в 3 л. с. (32 *т/сутки*) и диаметром в 3 *м* (50 *т/сутки*)

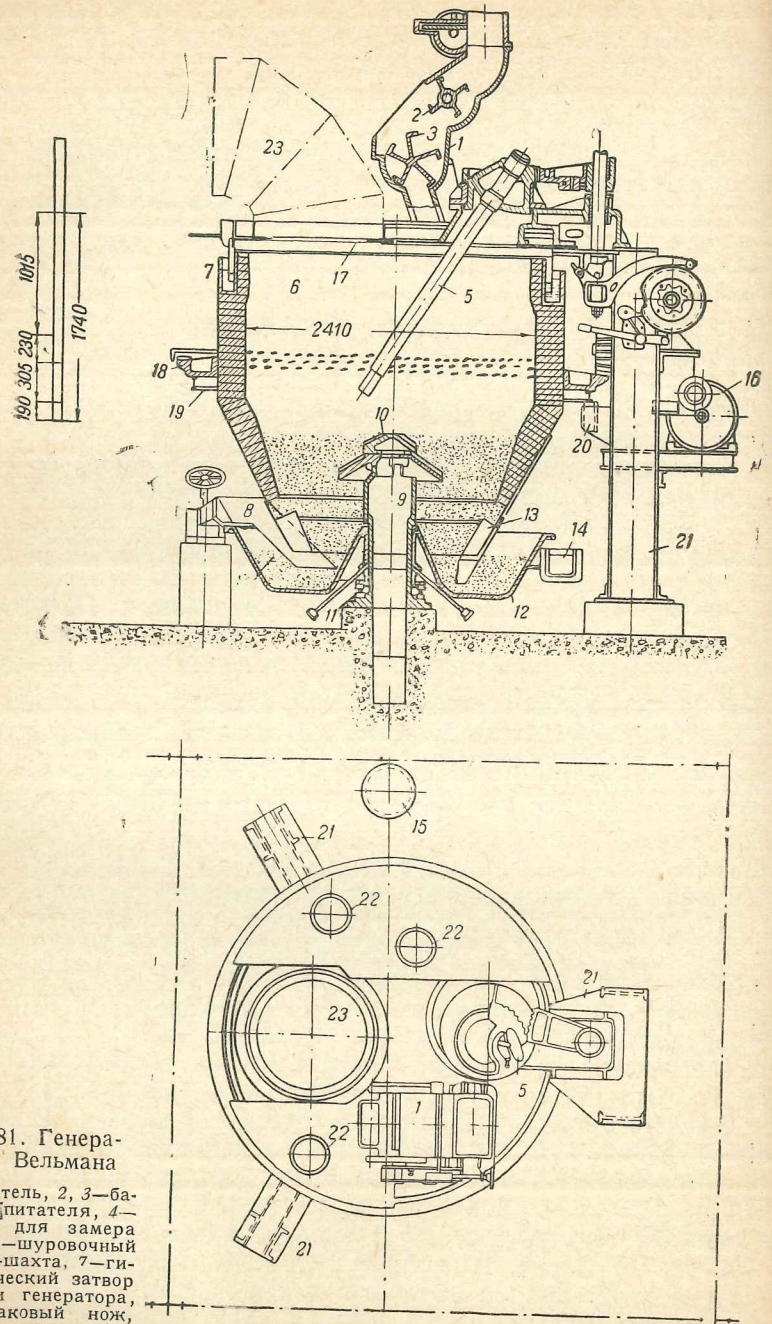


Рис. 81. Генератор Вельмана

1—питатель, *2*, *3*—барабаны питателя, *4*—штанга для замера зон, *5*—шуровочный лом, *6*—шахта, *7*—гидравлический затвор крышки генератора, *8*—шлаковый нож, *9*—воздухоподводящая труба с сальниковым уплотнением, *10*—решетка, *11*—шаровая опора чаши, *12*—чаша, *13*—скребки, *14*—сливной лоток для воды, *15*—паровой инжектор, *16*—мотор, *17*—металлическая охлаждаемая водой крышка, *18*—зубчатый венец шахты, *19*—опорный рельс, *20*—ролик, *21*—опорная колонна, *22*—шуровочные отверстия, *23*—газопровод

и 3,13 *м* (53 *т/сутки*) с мотором в 5 л. с. Производительность генераторов может быть повышена. Затрачиваемая в действительности мощность составляет около половины номинальной. Качание шуровочного лома (образующего часть конической поверхности) происходит в массе свежезагружаемого топлива. Качание лома и вращение шахты согласованы так, чтобы полный цикл происходил в 12 час. Весь уголь, прошуровавший за цикл, является прогазифицированным.

Мешалка Чапмана

На рис. 83 представлен генератор с мешалкой Чапмана, обычно применяемый в комбинации с автоматическим загрузочным приспособлением.

Мешалка состоит из горизонтального стержня, снабженного пальцами, и вертикального. При вращении мешалки горизонтальный стержень разравнивает слой, а пальцы бороздят уголь. Пальцы погружены в слой на 200—350 *мм*. Они направлены вниз и вперед в сторону вращения. Глубина погружения пальцев регулируется путем изменения величины груза, нагружаемого в коробку мешалки.

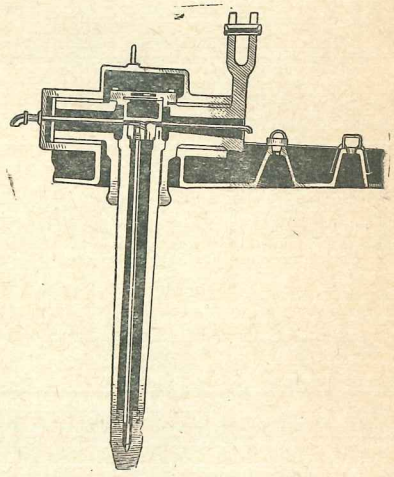


Рис. 82. Лом генератора Вельмана

Во втулке червячной шестерни, приводящей в движение мешалку, нарезаются по винтовой линии выступы, в которых ходит вертикальный стержень мешалки. При увеличении сопротивления движению мешалки, например при повышении слоя топлива, мешалка автоматически поднимается, и при понижении уровня топлива мешалка следует за ним.

Мешалка Чапмана приводится во вращение от электромотора с помощью червячной передачи. Она делает 7 об/час. К мешалке наглухо прикреплено кольцо, скользящее в пазах скребка, движущегося на распределительном конусе. Скребок очищает конус от смолы и налипшего угля.

Аппарат Чапмана допускает работу с переменным по высоте слоем топлива. Уровень мешалки может меняться в пределах 500—600 *мм*. Рейка, располагаемая у аппарата, указывает положение мешалки, а следовательно и слоя топлива. Охлаждающая аппарат вода поступает по трубке, снабженной гибким рукавом для возможности движения трубки с аппаратом. Вода проходит через внутреннюю трубу вала в пальцы мешалки, возвращается по внешней трубе вала и вливается через воронки в распределительный конус. По одной из подвесок конуса вода проходит в крышку и после смешения с дополнительно подаваемой водой поступает в охлаждающий кожух. Расход воды составляет примерно 2—3 $м^3/час$.

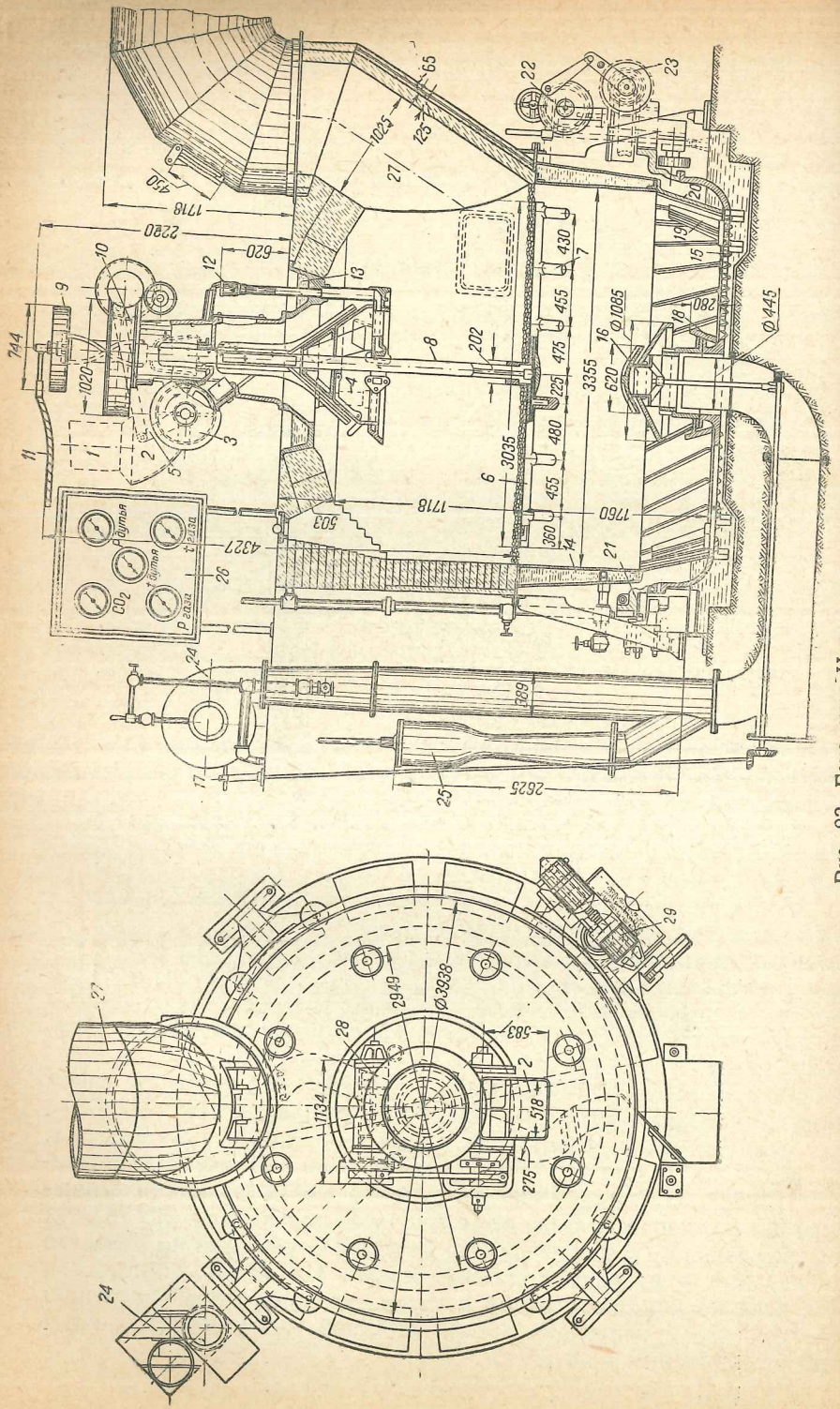


Рис. 83. Генератор Чапмана:

1—течка бункера, 2—приемная воронка, 3—питатель, 4—распределительный конус, 5—привод барабана питателя, 6—горизонтальный стержень, 7—пальцы мешалки, 8—вертикальный стержень, 9—коробка с грузом, 10—червячная шестерня, 11—шланг для охлаждающей воды, 12—воронка

Это шуровочное приспособление применяется в генераторах без вращающейся шахты, а также может быть применено в обычных генераторах, что является его достоинством.

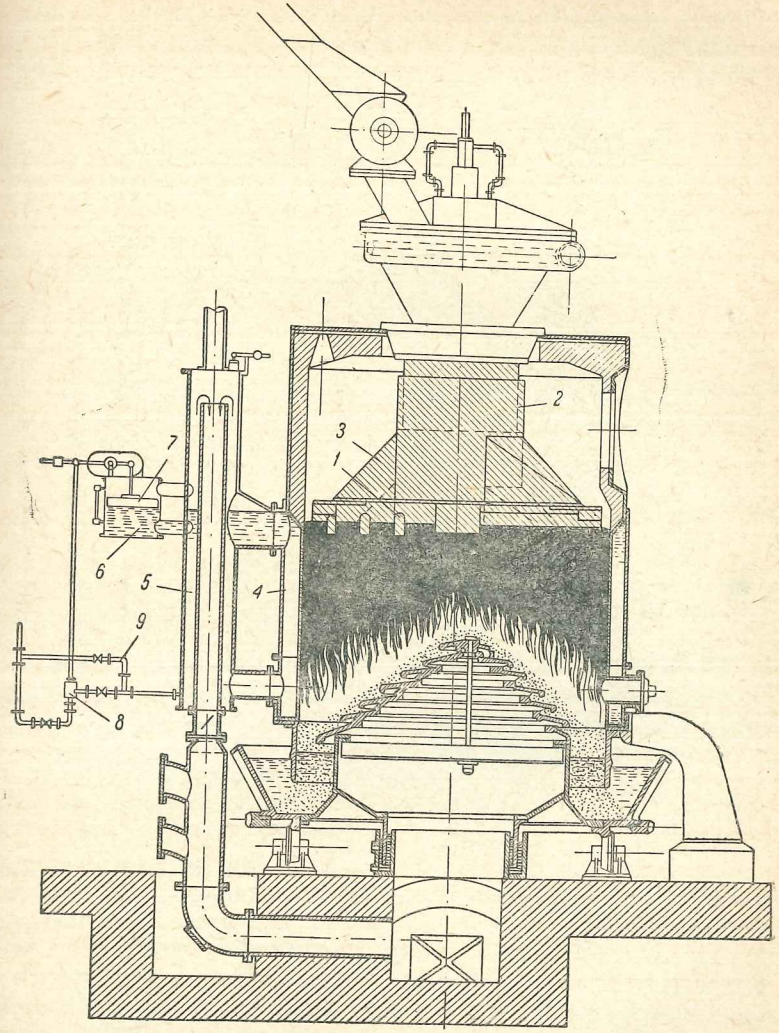


Рис. 84. Генератор с мешалкой Чапмана и цилиндром, препятствующим уносу пыли:

1—мешалка Чапмана, 2—цилиндр, 3—конус, 4—охлаждающий кожух, 5—паросборник, 6—автоматический питательный клапан кожуха, 7—поплавок, 8—клапан, связанный с поплавком, 9—обводной водопровод для ручного питания

Приспособление аппарата Чапмана к обычным конструкциям генераторов требует перекладки свода генератора.

Глубина погружения аппарата Чапмана в слой топлива зависит от крупности угля и его способности спекаться и устанавливается

опытом. Вес дополнительного груза, устанавливаемого на аппарате, составляет примерно 100 *кг*. Износ аппаратов не велик. Отмечаются случаи прогорания зубьев вследствие дефектов охлаждения.

В целях устранения пыли при питании в некоторых новейших конструкциях непосредственно под сводом или крышкой устанавливается цилиндр, из которого топливо постепенно ссыпается в генератор, причем пыль не подхватывается газовым потоком (рис. 84). Цилиндр выполняется из жароупорного металла, выдерживающего без коробления температуры до 1100°.

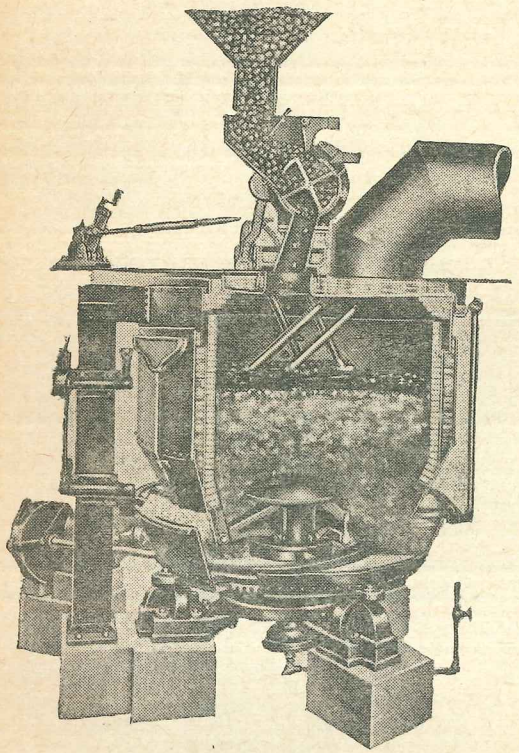


Рис. 85. Генератор Моргана

В нижней части подвешенного цилиндра помещен конус, способствующий подаче топлива к периферийной части генератора. Горизонтальный стержень аппарата Чапмана снабжен помимо зубьев разравнивающей лопатой, способствующей равномерному распределению топлива по сечению генератора.

Шурующее действие мешалки Чапмана меньше, чем шуровочного лома Вельмана.

Гребки Моргана

Генератор Моргана снабжается одним или двумя шурующими гребками.

На рис. 85 представлен механический генератор Моргана ($d = 3050$ *мм*).

Для разравнивания и ворошения слоя топлива служат два U-образных, охлаждаемых водой, гребка. Гребки свободно движутся в вертикальном направлении, и горизонтальная часть их все время погружена в слой топлива. Благодаря шурующему действию гребков и вращению шахты генератора с поверхности кусков топлива удаляется пленка золы и заполняются прозоры между кусками топлива. Вращающаяся шахта генератора поддерживается тремя кронштейнами, прикрепленными к чепцу, расположенному в центре чаши генератора и составляющему с ней одно целое. Шахта состоит из железного кожуха, футерованного огнеупорным кирпичом, и снабжена водяным охлаждением.

Для приведения во вращение чаши, а вместе с ней и шахты, служит зубчатый венец.

Крышка генератора стальная и снабжена водяным охлаждением.

Золоудаляющее приспособление состоит из спирального гребка, прикрепленного к чаше. Обычно гребок вращается вместе с чашей. При необходимости удалить золу гребок останавливают при помощи рычагов и держат неподвижным в течение одного оборота чаши (12 мин.), после чего он автоматически освобождается.

Для подачи топлива в генератор служит автоматический питатель. Конструкция питателя позволяет подавать в него куски угля размером до 13 *см* и обеспечивает равномерное распределение топлива по сечению генератора независимо от размера кусков. Питатель снабжен водяным охлаждением.

Верхняя стационарная часть генератора подвешена на трех колоннах, и на нее опирается крышка с питателем, автоматическими шуровочными приспособлениями и газоотводным штуцером.

По данным фирмы, средняя производительность описанного генератора Моргана составляет 2260 *кг* угля в час и может быть доведена до 12 000 *кг/час*. Расход пара на 1 *кг* угля — 0,25 *кг*; расход воды на охлаждение шахты, крышки и гребков — 1100 *л/час*. Расход энергии на привод чаши и шахты — $^3/_4$ л. с. и во время золоудаления — $1^1/_2$ л. с.

Шуровочные штанги

Применяют также механическое шурование через отверстия в своде генератора. Это дает возможность вести шуровку в любых частях слоя топлива, что невозможно при других приспособлениях. Особенное значение приобретает применение подобных приспособлений в генераторах больших размеров, где оно должно явиться дополнительным к другим видам автоматически шурующих приспособлений.

Управление действием приспособления для шуровки через отверстия в своде осуществляется вручную. Шуровочные штанги приводятся в движение с помощью электрической энергии или сжатого воздуха. Штанга может качаться во все стороны. Она может снабжаться охлаждающим кожухом.

На рис. 162 представлен генератор с подобным механическим шуровочным приспособлением — шуровочной штангой, которая может шуровать любой участок слоя топлива и разрушить шлак любой твердости. Привод штанги — от электромотора, приводящего в то же время в периодическое движение крышку генератора. Газовщик только включает мотор и устанавливает штангу. Шуровочная штанга охлаждается водой. Один газовщик обслуживает несколько генераторов, причем работа протекает значительно лучше и равномернее, чем при ручной шуровке. Условия труда при подобных шуровочных приспособлениях значительно улучшаются.

7. ГАЗОГЕНЕРАТОРЫ С РАЗЛОЖЕНИЕМ СМОЛ

При газификации некоторых топлив выделяются смолистые вещества, которые загрязняют газопроводы и вызывают необходимость в периодической очистке их. Кроме того содержание в газе смол бы-

вает весьма нежелательным при применении газа для питания газовых двигателей, весьма чувствительных вследствие засорения клапанов даже к небольшому содержанию смолы в газе.

Помимо соображений очистки иногда разложение продуктов сухой перегонки вызывается желанием разложить при газификации влажных низкосортных топлив помимо смол также водяные пары, содержащиеся в газе, и тем самым обогатить газ продуктами разложения смол и влаги. Для этой цели продукты перегонки вынуждают пройти слой раскаленного кокса.

Существует много конструкций, предусматривающих разложение этих смол и получение из них горючих газов.

К числу этих генераторов относятся генераторы с внутренними ретортами и перегородками, в которых выделяющиеся продукты сухой перегонки вынуждены благодаря наличию реторты или перегородки опуститься, пройти зону раскаленного угля и под влиянием высокой температуры разложиться.

По предложению Рише, применяют сдвоенные газогенераторы, работающие таким образом, что газ, полученный в одной шахте, сжигается и с избыточным воздухом подается во вторую шахту, заполненную слоем кокса, в которой и происходит образование горючих газов.

На несколько отличном принципе основано применение генераторов Дейца, состоящих из двух шахт. В одну из шахт засыпают каменный уголь, в другую — кокс. Воздух подается под решетку каменноугольного генератора и сверху смолистый газ отводится из него под решетку второго генератора, заполненного коксом. Последний поддерживается в раскаленном состоянии в результате подачи воздуха через сопло. Смоляные пары каменноугольного газа при высокой температуре кокса разлагаются, и газ получается бессмольным и обогащенным продуктами разложения смол и влаги.

Этот способ невыгоден из-за необходимости сжигания кокса.

Твайт предложил соединять по две шахты и связывать их ходами. В обеих шахтах газифицируется топливо, содержащее значительное количество смолистых веществ. С помощью инжектора воздух просасывается в одну шахту, в которой направляется снизу вверх. Полученные газы идут по верхнему соединительному каналу во вторую шахту и проходят слой топлива сверху вниз, причем смолистые вещества разлагаются в раскаленном слое второй шахты. Из второй шахты газы отводятся снизу. По охлаждении слоя во второй шахте переключается клапан, направляющий воздух и газ, и меняется направление пара. Воздух начинает поступать снизу во вторую шахту, а газы с продуктами сухой перегонки — из второй шахты сверху в первую. Полученный газ отводится из первой шахты снизу.

Шахты могут быть расположены рядом или одна над другой. Сдвоенные генераторы вследствие применения двух шахт имеют увеличенные потери в окружающую среду и громоздки.

На рис. 86 представлен обращенный генератор для получения силового газа из древесной щепы. Воздух подводится через три ряда фурм *9*. Выше фурм в шахте *1* топливо несколько подсушивается,

и выделяющаяся влага конденсируется в кольцевом пространстве *2*, откуда и отводится. Топливо лежит на плоской колосниковой решетке *5*, поддерживаемой полосами *6*, по которым она может скользить. Решетка соединена с рычагом *7* для встряхивания. Зола ссыпается из зольника *4* в гидравлический затвор *12*. Шахта газификации *3* снабжена шуровочными отверстиями *10* и лазом *11*. Газ отводится через отверстие *8*.

Генератор разжигается сверху, и раскаленная зона находится вверху. При загрузке топлива происходит его сухая перегонка, продукты которой проходят раскаленную зону и разлагаются. При этом воздух и топливо движутся в одном направлении, и смесь шлака и угля в нижней части генератора не омывается кислородом, а находится в соприкосновении с генераторным газом. По этой причине остатки плохо выжигаются, и со шлаком удаляется много угля. Кроме того температура отходящих газов высока.

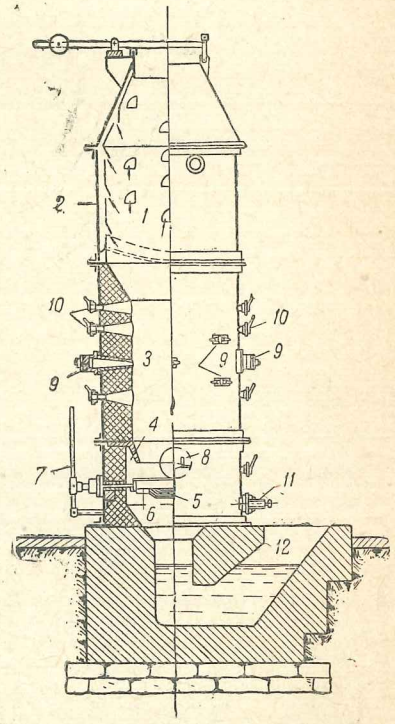


Рис. 86. Генератор с обращенным движением газов

Чтобы избежать больших потерь топлива, применяют генераторы с двумя зонами горения (рис. 87), в которых воздух поступает и сверху, где идет сухая перегонка, и снизу—для газификации кокса. Продукты сухой перегонки топлива разлагаются в условиях температуры верхней зоны, а хороший выжиг остатков достигается вследствие подвода дутья снизу. Генераторный газ отводится из середины слоя.

В генераторах с двойной зоной для отвода газов обычно служит кольцевой канал, образующийся благодаря меньшему сечению (рис. 87) или сужению верхней части и находящийся на периферии генератора; иногда же канал образуется лежащим по оси генератора горизонтальным угольником, обращенным кверху угловым ребром.

Практика показала значительно лучшее использование в генераторах с двойной зоной древесины, торфа и брикетов бурого угля, чем каменного угля. Колебания в нагрузке чрезвычайно неблагоприятно отражаются на состоянии верхней зоны и образовании газа. При малой нагрузке трудно устранить попадание в газопровод неразложенных смолистых веществ.

Помимо обращенного направления газов много попыток сделано в отношении разложения смолистых веществ путем их подведения обводным каналом в раскаленный слой или под решетку. В качестве побудителя для движения газов в подобных случаях обычно служит

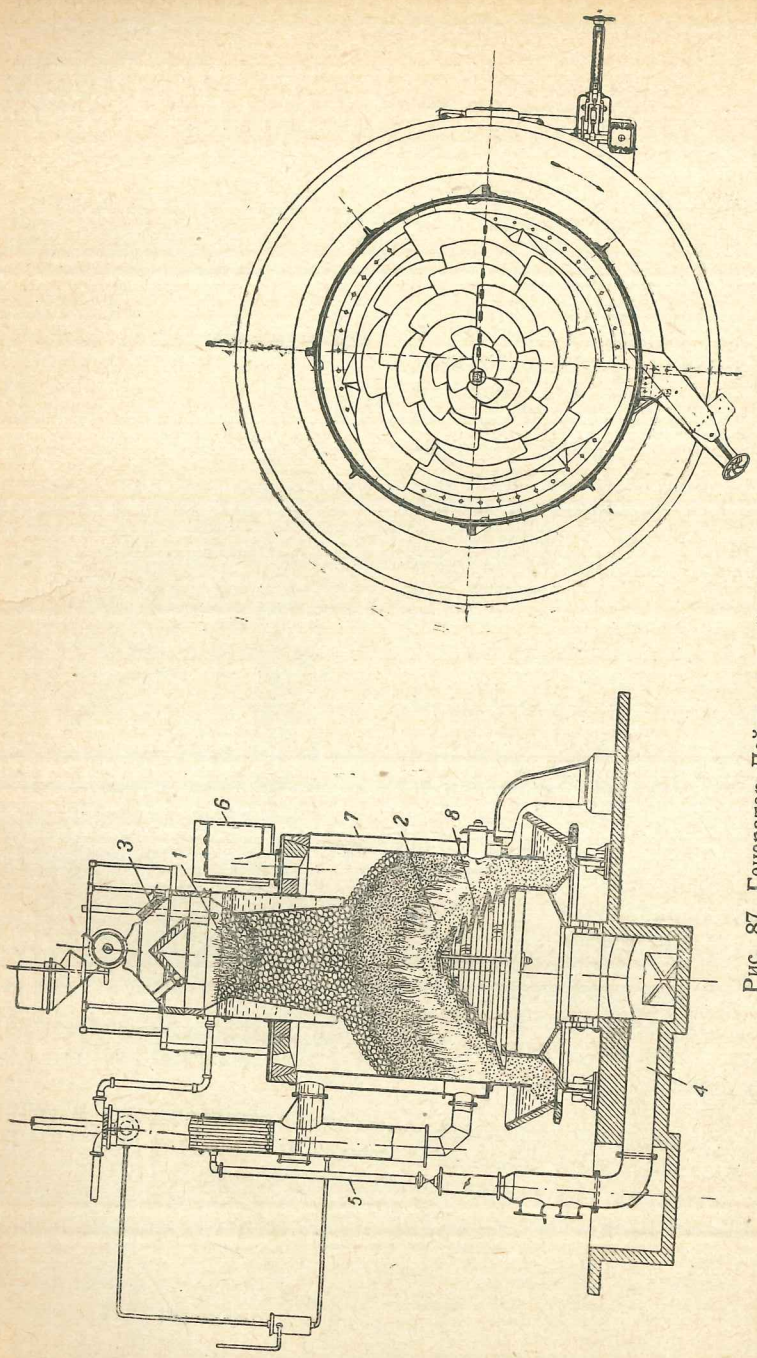


Рис. 87. Генератор Дейца с двойной зоной горения:
1—верхняя зона горения, 2—нижняя зона горения, 3—подача воздуха сверху, 4—подача паровоздушной смеси снизу, 5—подача пара для увлажнения дутья, 6—газопровод, 7—охлаждающий кожух, 8—вращающаяся решетка

паровой инжектор, вызывающий также прохождение через зону перегонки горячих газов, подогревающих ее.

Слабым местом подобных установок является применение засасывающего горячий загрязненный газ и засоряющегося инжектора.

В некоторых конструкциях предусматривается подвод продуктов сухой перегонки в раскаленный слой, где они разлагаются без предварительного их сжигания.

Для разложения смолистых веществ предлагается также подведение в генератор топлива снизу.

Генераторы с разложением смол обслуживают преимущественно газовые двигатели (силовой газ). В последние годы начало усиленно развиваться строительство небольших газогенераторов для обслуживания автомобилей и тракторов, что связано с дефицитностью жидкого топлива (см. ниже).

8. ГАЗОГЕНЕРАТОРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СМОЛ

Получаемые при сухой перегонке топлива смолы могут представлять собой ценный продукт. В обыкновенных генераторах с низким слоем топлива последнее сравнительно быстро попадает в зону высокой температуры, под влиянием которой смолы распадаются на постоянные углеводороды и сажу, а также претерпевают изменения в своем составе, понижающие их качество как продукта, имеющего самостоятельное промышленное значение для переработки.

При желании получить смолу хорошего качества и в максимально возможном количестве необходимо принять меры к достаточной продолжительности пребывания топлива в температурном интервале, соответствующем выделению смолы, и удалению смоляных паров без последующего их нагревания.

Для полного выделения смол требуется 5—6 час., и следовательно для пространства, где идет перегонка топлива, требуется большой объем. Первоначальные конструкции генераторов с внутренними ретортами, обогреваемыми снаружи газами, оказались неудовлетворительными вследствие трудности установки в генераторе большого размера реторт, а также вследствие плохой теплопередачи от газа к топливу через стенку.

По этой причине перешли к конструкциям, где газ пропускается для производства перегонки через слой топлива. Для этой цели над генератором устанавливают надстройку — шахту меньшего сечения, нежели основная. Эта шахта называется швельшахтой; в ней происходит сухая перегонка топлива путем нагрева его газами, поднимающимися снизу.

Это устройство дает возможность получить ценную смолу, так называемую первичную, перегоняемую при низких температурах.

Низкая и равномерная температура газов, пропускаемых через слой топлива в швельшахте, достигается наличием высокого слоя топлива и пропусканием в случае сухого топлива через швельшахту только части газов, получаемых в нижней шахте.

Малый диаметр швельшахты повышает скорость движения газов, что улучшает теплообмен и способствует более быстрому выделению

смолы из топлива, а также благоприятствует равномерности распределения по сечению топлива и газов.

Соответственно большой высоте слоя топлива в генераторе со швельшахтой отдельные зоны получают хорошее развитие и обеспечивают хорошие состав газа и выжиг остатков, высокую производительность и равномерный ход.

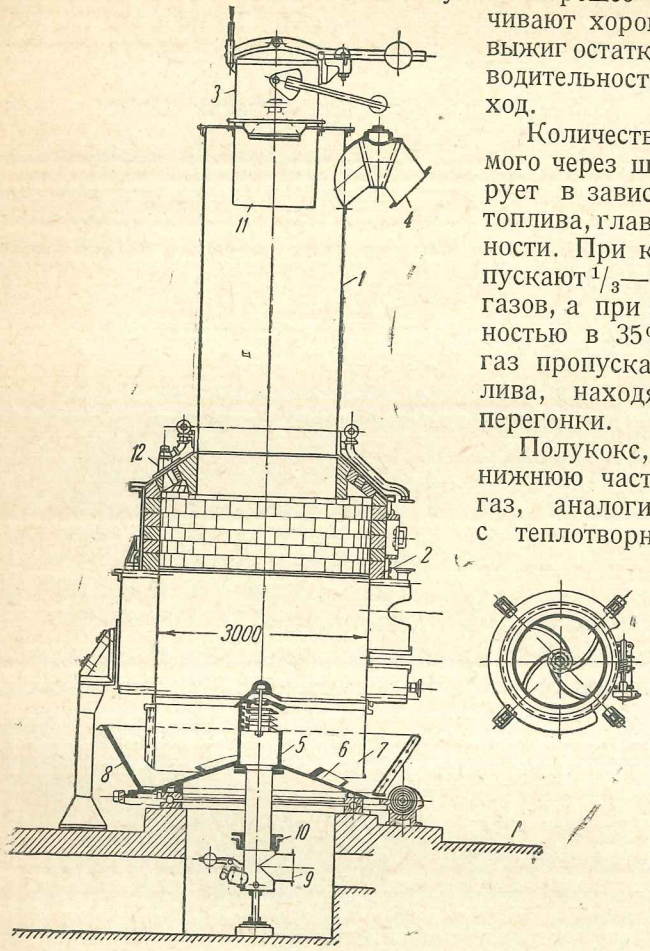


Рис. 88. Генератор со швельшахтой с одним отъемом газа:
1—швельшахта, *2*—нижняя шахта, *3*—загрузочная коробка, *4*—газопровод, *5*—центральная решетка, *6*—фрезера чаши, *7*—фартук, *8*—чаша, *9*—подвод воздуха, *10*—сальник, *11*—цилиндр (юбка), предотвращающий унос пыли, *12*—шуровочное отверстие

Количество газа, пропускаемого через швельшахту, варьирует в зависимости от свойств топлива, главным образом влажности. При каменном угле пропускают $^1/_3$—$^1/_4$ всего количества газов, а при буром угле с влажностью в 35% приходится весь газ пропускать через слой топлива, находящийся в стадии перегонки.

Полукокс, попадающий в нижнюю часть генератора, дает газ, аналогичный коксовому, с теплотворной способностью в 1150—1200 *кал/м*³ и с температурой около 700°. Часть газа (или весь газ) проходит пространство швелевания и за счет физического тепла этого газа поддерживается процесс перегонки. Газ обогащается перегоночными газами и смолистыми веществами и с температурой около 100° выходит из перегонной камеры к очистительной установке. Полукокс спускается вниз с температурой примерно 500°.

На рис. 88 представлен генератор для влажного топлива.

В нем весь газ пропускается через швельшахту. На рис. 89 показан генератор с двумя отъемами, предназначенный для сухого топлива. Часть газов отбирается под швельшахтой. В швельшахту пускается

только такое количество газа, чтобы его теплосодержание покрыло расход тепла на подсушку топлива, сухую перегонку и потерю в окружающую среду без значительного повышения температуры в швельшахте. Устройство швельшахты дает возможность, несмотря на высокий слой топлива, производить шуровку шахты.

При одном отъеме газа ход процесса равномернее и регулировка легче. Поэтому для возможности устройства одного отъема в случае не очень большой влажности топлива швельшахту иногда делают малого диаметра, высокой и неизолированной, что вызывает повышенную потерю тепла во внешнее пространство и дает возможность пропускать через швельшахту весь газ.

Устройство отдельных отъемов дает возможность отбирать меньшее количество газов через швельшахту и следовательно подвергать очистке меньшее количество их. Кроме того в этом случае из швельшахты отбирается газ с более высокой теплотворной способностью, чем при одном отъеме. Физическое тепло горячего газа из нижнего отъема может быть использовано для получения пара в трубчатом котле, что было бы невозможно при газификации содержащего смолу топлива в генераторе с одним отъемом вследствие засорения котла смолой.

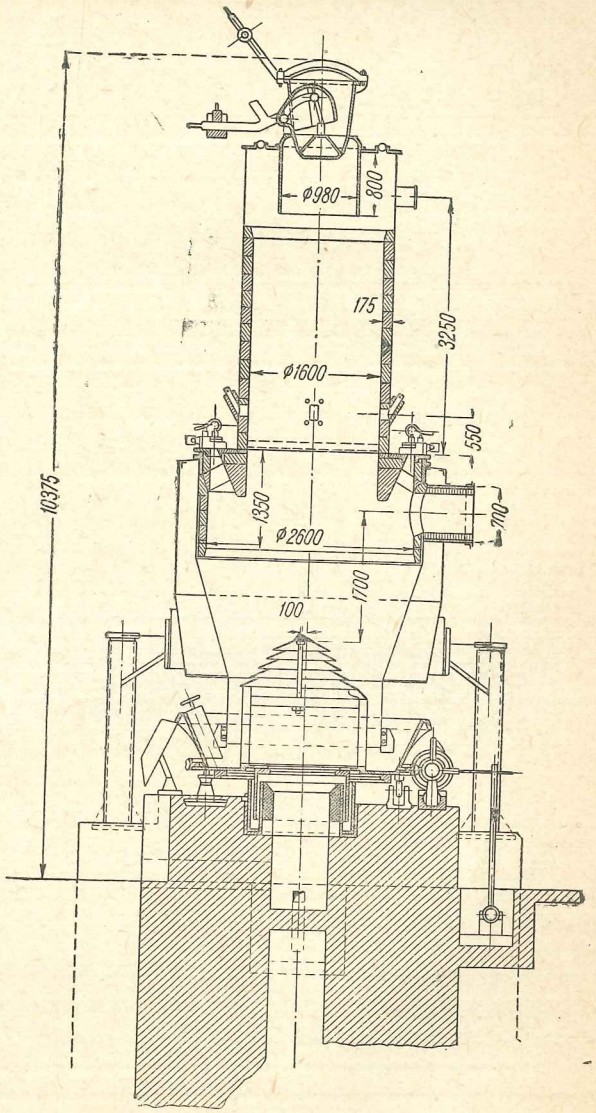


Рис. 89. Генератор со швельшахтой с двумя отъемами газа

Продолжительность перегонки и следовательно размеры перегон-

ных камер возможно сократить, если вести этот процесс при непрерыв-
ном движении топлива с помощью мешалки. Подобное устройств
(аппарат Линка) может быть применено для каменных углей, дост
точно прочных и не слишком спекающихся. В этом случае продолжи
тельность процесса швелевания может быть сокращена до 2—3 час
и перегонную камеру можно поместить в самом генераторе. Э
устройство может быть приспособлено к существующим установка
без значительных переделок, требуемых в случае надстройки швел
шахт (площадки, бункера).

Фирмы, строившие генераторы с внутренними перегонными ка
мерами и приспособлениями для ворошения топлива, от применени
таковых отказались и перешли к генераторам со швельшахтами
причем в новых конструкциях этих генераторов предусматриваются
отделение швельшахты от нижней шахты и применение специального
вращающегося приспособления для ворошения топлива и равномер
ной загрузки его из швельшахты в нижнюю шахту. В подобном гене
раторе под швельшахтой отсутствуют более плотный центральный
плохо пронизываемый газами столб топлива, имеющийся в обычных
генераторах со швельшахтами, и спекание топлива.

Выход смолы в генераторах со швельшахтами и подвешенными
внутренними камерами может составлять при хорошем ведении про
цесса 85—90% и при плохих условиях — 70—75%, тогда как
в обыкновенных генераторах он не превышает 50—60% от опреде
ляемого лабораторным путем.

Лучшее качество смолы при газификации получается при более
сухом топливе.

Целесообразнее также применять кусковое топливо или брикеты
сравнительно с мелким или распадающимся топливом.

В табл. 44—46 приведены данные о составе газа при генераторах
со швельшахтами и о работе таковых.

9. ТРАНСПОРТНЫЕ ГАЗОГЕНЕРАТОРЫ

Огромное значение газогенераторы с разложением смол приоб
рели для нужд автотранспорта и стационарных газовых двигателей.
Малые размеры этих установок и необходимость максимального их
облегчения заставляют отказаться от очистки газа от смолы и прибег
нуть к ее разложению в газогенераторе.

Современные транспортные газогенераторы представляют собой
различного сечения шахты, обычно выполняемые из металла, иногда
снабженные футеровкой и изредка — охлаждающим кожухом-испари
телем в области высоких температур. Эти генераторы обычно снаб
жаются горизонтальной колосниковой решеткой, иногда же они со
всем ее не имеют. Удаление золы в них производится вручную. К газо
генераторам транспортного типа предъявляются требования малого
занимаемого места, удобства расположения в пределах транспортной
машины, простоты обслуживания, легкости пуска, приспособления
к изменениям нагрузки и т. д. В транспортных газогенераторах при
меняют преимущественно топлива с малым содержанием золы и обла-

дающие благоприятными для газификации свойствами (особенно в отношении шлакования).

Транспортные газогенераторы снабжаются бункерами с люком для загрузки, вмещающими запас на 2—3 часа работы, и вентилятором для разжига. Для антрацита и кокса применяли вначале только генераторы с восходящим движением газов. Неудобством этой конструкции являлась необходимость регулирования добавки пара в зависимости от производительности, и поэтому пользовались сухим дутьем, что обеспечивало бóльшую устойчивость процесса, но приводило к уменьшению теплотворной способности газа и к. п. д., повышению температуры газа, затруднявшему охлаждение его, и уменьшению скорости горения газа ввиду уменьшения содержания в нем водорода, а также в случае легкоплавкости золы и к неполадкам, связанным со шлакованием.

Одна из подобных последних конструкций представлена на рис. 90.

Она предназначена для газификации антрацита, кокса и полукокса. Генератор обмурован и снабжен в нижней части испарительной камерой, в которую впрыскивается вода. Воздух проходит эту камеру, насыщается паром и через сопло в середине генератора поступает в слой топлива. Количество впрыскиваемой воды регулируется в зависимости от производительности. Отбор газов производится над слоем топлива. В настоящее время бессмольные топлива газифицируют также в газогенераторах с обращенным движением газов.

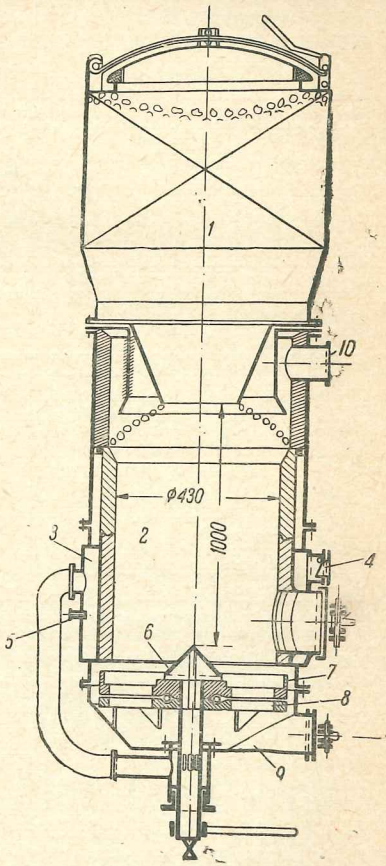
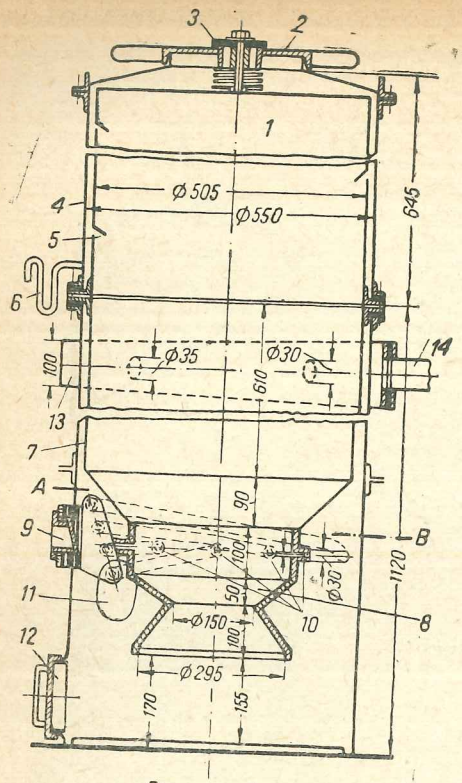


Рис. 90. Транспортный генератор с восходящим движением газов:
1—бункер *2* — шахта, *3*—испарительная камера, *4*—отверстие для входа воздуха, *5* — ввод воды, *6*—сопло для ввода воздуха в генератор, *7*—тарелка для ворошения слоя золы, *8*—опорная тарелка, *9*—зольный карман, *10*—газоотводный штуцер

Транспортные газогенераторы с разложением смол выполняются преимущественно в виде газогенераторов с «обращенным процессом». Применением обращенного движения газов достигается разложение смол, возможность отказа от подвода влаги (влага топлива попадает в зону газификации) и газификации в одном газогенераторе смолистых и бессмольных топлив.

Подвод дутья в этих газогенераторах производится или в центре, или с периферии, или комбинированным путем.

В последних конструкциях суживают фурменный пояс или применяют центральный подвод дутья. Это перемещает область высоких



Разрез по А-В

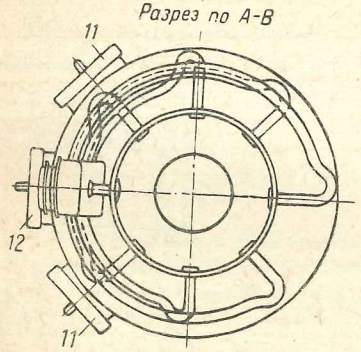


Рис. 91. Транспортный генератор с обращенным движением газов:

1—бункер, *2*—загрузочный люк, *3*—предохранительный клапан, *4* — конденсационная камера, *5*—отверстия для прохода паров воды, *6*—трубка для отвода конденсата, *7* — шахта, *8*—камера газификации—топливник, *9*—отверстие для засасывания воздуха с обратным клапаном, *10*—отверстия для распределения воздуха по сечению генератора, *11*—люк для засыпки древесного угля, *12*—зольниковый люк, *13* — кольцевой канал для сбора газа, *14*—газоотводной штуцер

температур в слое топлива к с редине и дает возможность отк заться от огнеупорной фут ровки. Генератор также сужи вают книзу, что имеет цель повышение температуры в су женном участке и обеспечени прохождения смолистых вещест в зоне высоких температур.

Газ отводится или над р шеткой или под ней.

При газификации влажны топлив и пониженных нагруз ках наблюдается прохождение че рез зону высоких температур значительных количеств нераз ложенной смолы, для удаления которых иногда предусматри вается дополнительный ввод воздуха ниже основного пояса фурм или у места выхода газа из газогенератора. В последнем случае сжигаемый газ поддер живает в раскаленном состоя нии специально предусмотрен ную насадку. Иногда в камеру, в которую выходит газ из ге нератора, для очистки газа вво дят слой древесного угля.

Бункер генератора при влаж ном топливе служит не только для запаса топлива. При влаж ном топливе в результате его подсушки влага частично испа ряется, проходит через отвер стия во внутреннем кожухе бун кера в кольцевое свободное про странство между внутренним и внешним кожухами, конденси руется и отводится через сифон ную трубку.

Иногда бункер в целях под сушки топлива обогревается снаружи генераторным газом.

На рис. 91 представлен гене ратор с обращенным движением газов, предназначенный для га зификации влажных топлив (древесина с влажностью в 30— 35%). Бункер генератора, вы-

полненный из тонкой листовой стали, снабжен загрузочным люком с предохранительным клапаном, отверстиями для отвода паров воды в конденсационное кольцевое пространство и трубкой для спуска конденсата. Топливник имеет диаболообразную форму и выполнен из огнеупорной стали. Отсасываемый газ омывает нижнюю часть бункера снаружи и подогревает его. Воздуховсасывающее отверстие снабжено обратным клапаном. Воздух к отдельным фурмам подводится трубками. Во избежание уноса с газами неразложенной смолы возможно подсыпать древесный уголь через люк в камеру, через которую газ выходит из генератора.

В настоящее время применяют также поперечное направление газов. При поперечном токе газы движутся в горизонтальном направлении и зоны располагаются вертикальными слоями. При этом раскаленная зона имеет небольшой размер и процессы газификации сосредоточиваются в малом объеме, в котором вследствие большой подачи кислорода они активируются и повышается температура. Это влечет за собой хорошее разложение смолистых веществ даже при неполной нагрузке генератора, при которой в генераторе с обращенным движением газов температура настолько падает, что проскакивают значительные количества смолистых веществ. Шлак проходит в расплавленном состоянии зону максимальных температур и за ней гранулируется.

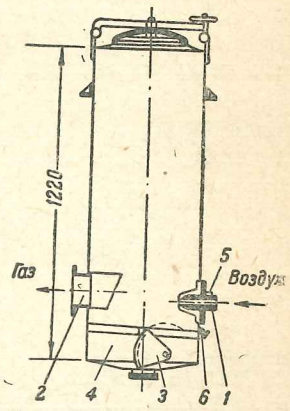


Рис. 92. Транспортный генератор с поперечным направлением газов:

1—охлаждаемая водой фурма для ввода воздуха, *2*—газоотводный штуцер, *3*—рычаг качающейся решетки, *4*—зольник, *5*—канал для воды, *6*—отверстие для шуровки

Эта конструкция менее чувствительна к увеличению добавки пара—повидимому ввиду перемещения раскаленной зоны вверх и оседания излишней влаги в зоне золы и шлака. Эта конструкция также позволяет использовать топлива с более легкоплавкой золой.

На рис. 92 показан генератор с поперечным направлением газов. Шахта генератора — овального или круглого сечения. Бункер вверху снабжен плотным загрузочным люком. В нижней части шахты имеются охлаждаемая водой фурма для подачи дутья и газоотводный штуцер, расположенные друг против друга. Снизу топливник снабжен наклонным дном и качающейся колосниковой решеткой для периодического сбрасывания шлака в зольник. Подвод воды к дутью производится через канал для охлаждения фурмы. Для шуровки предусмотрено отверстие. Воздушное сопло и газоприемный патрубок введены внутрь генератора, что позволяет избежать применения огнеупорной футеровки.

Работа генератора возможна при опускании слоя топлива до уровня 150 *мм* выше фурм. Температура зоны газификации может быть очень высока.

Подобные генераторы хорошо работают на антраците с размером зерен в 5—10 *мм* при зольности не выше 8—10%.

В современных газогенераторах транспортного типа интенсивность газификации на 1 $м^2$ сечения составляет 100—250 *кг* древесного угля и 500—1000 *кг/час* сухой древесины. Расход топлива на 1 л. с. час составляет 0,5—0,6 *кг* древесного угля или 1—1,5 *кг* древесины с влажностью в 17—20%.

Состав газов, получаемых в газогенераторах при различном направлении газов, см. во второй части.

10. ГАЗОГЕНЕРАТОРЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВОДЯНОГО ГАЗА

Как уже указывалось, в генераторах водяного газа ведут попеременно воздушное и паровое дутье.

Продолжительность воздушного дутья лимитируется чрезмерным повышением температуры слоя топлива, при котором образование CO большое и сильно увеличивается потеря с отходящими газами. Паровое дутье ведется до тех пор, пока температура слоя топлива не упадет значительно и разложение не окажется слишком малым. Высота слоя топлива в генераторе водяного газа обычно не превышает 2 *м*.

При вдувании водяного пара снизу нижняя часть слоя топлива сильно охлаждается, а верхняя остается горячей. Это влечет за собой худшее выгорание топлива, получение в период воздушного дутья большего количества CO в газах и более высокую температуру последних.

Поэтому в старых установках малых размеров часто подавали паровое дутье только сверху (см. «Введение»).

В современных установках для улучшения режима и достижения большей экономичности процесса чередуют дутье пара снизу и сверху. Дутье пара сверху вниз не должно производиться непосредственно после воздушного дутья, так как водяной газ может образовать под решеткой в смеси с оставшимся воздухом взрывчатую смесь; поэтому перед пуском пара сверху необходим пуск пара снизу. По этим же причинам перед пуском воздуха в генератор подают под решетку пар. Соотношение количеств пара, подаваемого вверх и вниз, должно быть такое, чтобы горячая зона была возможно ниже.

Стадии цикла работы генератора и схемы установок водяного газа

Продолжительность полного цикла парового и воздушного дутья колеблется в пределах 4—15 мин. Чем короче цикл, тем равномернее и лучше работа генератора; однако при слишком малой продолжительности цикла относительно много времени затрачивается на переключение клапанов и продувки и больше продувочных газов примешивается к водяному газу.

Сложность обслуживания установок водяного газа, заключающаяся в необходимости частого переключения клапанов, вызвала применение механизмов, автоматически открывающих и закрывающих их по определенному расписанию. Применение их также способствует уменьшению продолжительности отдельных циклов.

В табл. 48 приведены данные Рамбуша (124) относительно продолжительности отдельных стадий при производстве водяного газа. Во многих установках стадия парового дутья подразделяется на две — дутье сверху и дутье снизу.

Таблица 48

Продолжительность отдельных стадий при получении водяного газа

№ стадий	Наименование стадии	Род дутья	Продукт	Продолжительность стадии (в % от общей)
1	Горячее дутье	Воздух	Продувочный газ	10 - 45
2	Продувка паром после горячего дутья	Пар	То же	1 - 5
3	Газификация	»	Водяной газ	50—85
4	Продувка после газификации	Воздух	То же	0,2—1

На рис. 93, 94 и 95 представлены установки для получения водяного газа. По схеме (рис. 94) продувочные газы до попадания в котел утилизатор дожигаются в специальной камере, в которую подается вторичный воздух. Пар для дутья, собирающийся вверху рубашки и в паросборнике, подается попеременно сверху и снизу генератора.

Охлаждение и очистка генераторного газа производятся в скруббере.

Дожигание продуктов воздушного дутья может производиться также в самом газогенераторе; для этой цели в верхнюю часть генератора должно быть подведено воздушное дутье. Это способствует сокращению продолжительности воздушного дутья и быстрому разогреву слоя.

Из практики работы новейшей установки генераторов возможно привести следующие данные. Весь процесс состоит из шести стадий.

В стадии воздушного (горячего) дутья воздух пропускается в течение 1 мин. через кокс снизу, а продукты горения углерода отводятся в атмосферу. Температура кокса при этом поднимается. После прекращения подачи воздуха через кокс в течение 10 сек. снизу пропускается пар. Получающийся газ, смешанный с воздухом, остающимся после воздушного дутья, выпускается в атмосферу (продувка). В третьей стадии пуск пара в генератор снизу вверх продолжается, но образующийся чистый водяной газ направляется уже не в атмосферу, а в коллектор газа. Эта стадия — газификации снизу — продолжается $2^1/_2$ мин., и при этом температура кокса, особенно в нижней части слоя, падает. Верхний слой кокса остается достаточно горячим

для продолжения процесса выработки газа. В это время процесс вступает в четвертую стадию — меняется направление пара, и он пускается сверху. Эта стадия — газификация сверху — длится 1 мин.

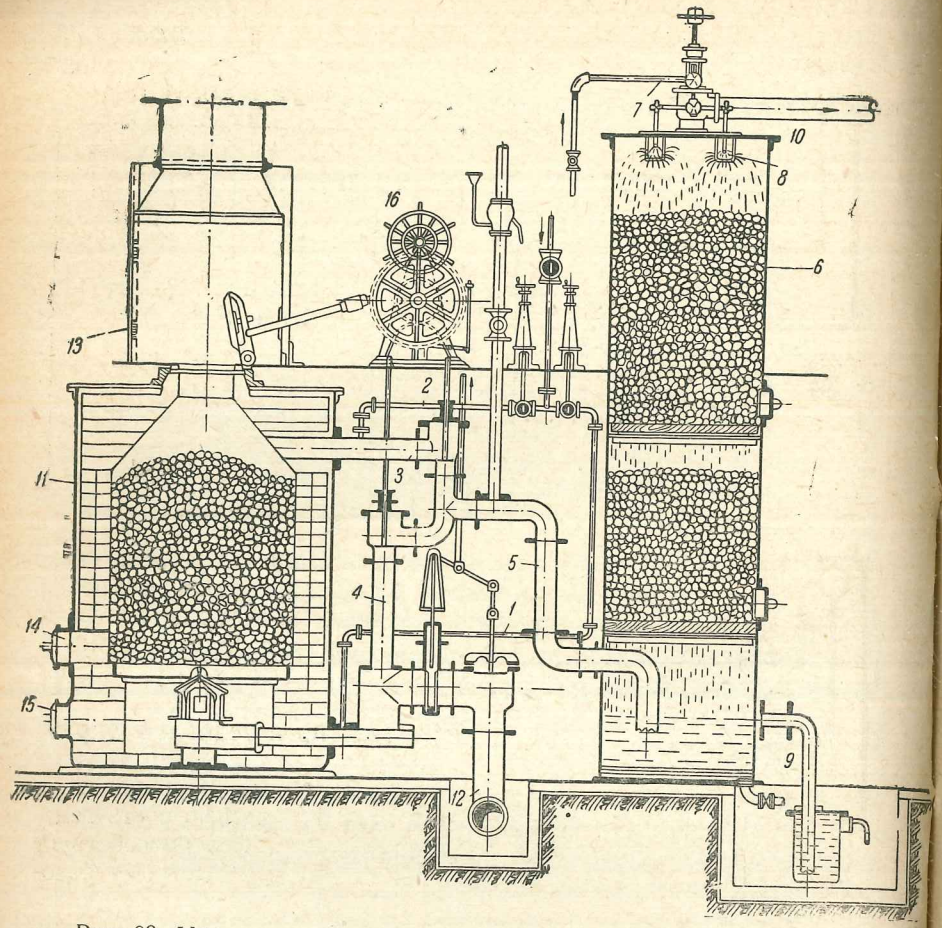


Рис. 93. Установка для получения водяного газа без использования продуктов возду шного дутья:

1—паропровод к нижней части генератора, *2*—паропровод к верхней части генератора, *3*—газопровод водяного газа от верхней части генератора, *4*—газопровод водяного газа от нижней части генератора, *5*—газопровод водяного газа к скрубберу, *6*—скруббер для промывки газов, *7*—подача воды в скруббер, *8*—разбрызгивающие воду приспособления, *9*—отвод воды, *10*—газопровод из скруббера, *11*—газогенератор, *12*—воздухопровод от вентилятора, *13*—труба для отвода продуктов воздушного дутья в атмосферу, *14*, *15*—люки для осмотра и чистки, *16*—лебедка для управления клапанами

Газ при этом отводится снизу. Пятая стадия заключается в переключении пара на нижнее дутье. Это — промежуточная стадия, имеющая целью очистить нижнюю часть генератора и газопровод от газа во избежание взрыва, могущего быть при подаче воздуха. Газ при этом отводится сверху. Эта стадия продолжается 15 сек. Последняя, шестая стадия заключается в пропуске в течение 5 сек. воздуха для

вывода остатков газа из генератора и каналов в главный коллектор. Эта стадия называется продувкой после газификации.

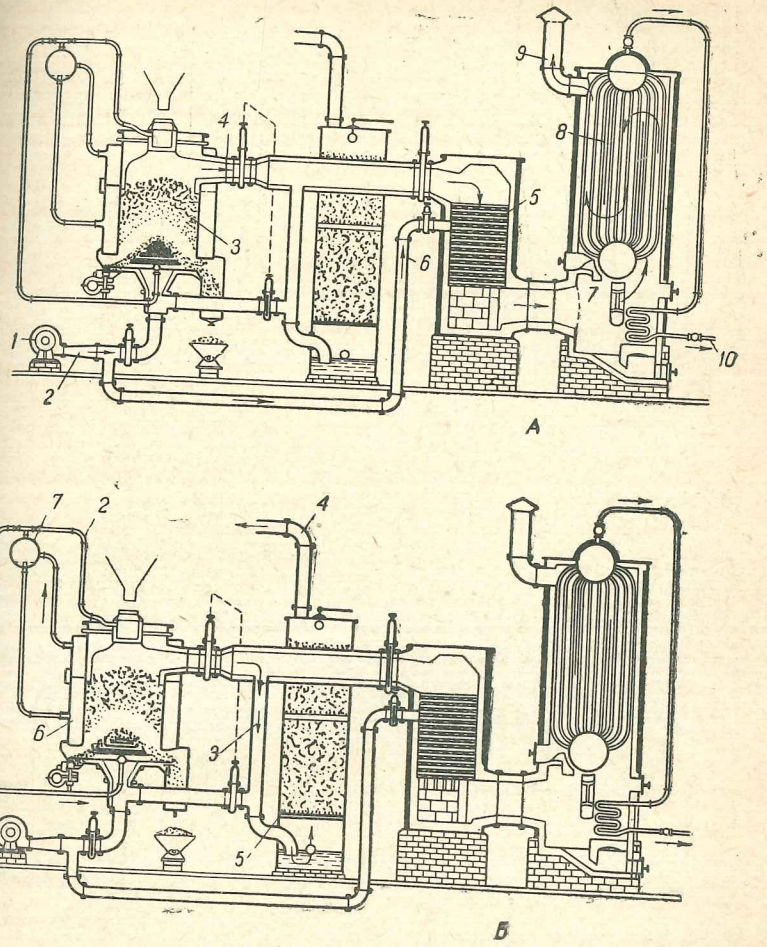


Рис. 94. Установка для получения водяного газа с использованием продуктов воздушного дутья:

А—горячее дутье: *1*—вентилятор, *2*—подача воздуха, *3*—генератор, *4*—ход продуктов горячего дутья, *5*—камера сгорания, *6*—подача воздуха в камеру сгорания, *7*—ход продуктов сгорания, *8* котел-утилизатор, *9*—отвод продуктов сгорания в атмосферу, *10*—отвод перегретого пара. *Б*—паровое дутье: *1*—подача пара снизу, *2*—подача пара сверху, *3*—ход водяного газа, *4*—отвод водяного газа, *5*—скруббер, *6*—пароводяная рубашка, *7*—паросборник

Рис. 96 дает представление об изменении количества получаемого газа в период парового дутья снизу вверх и сверху вниз.

Генератор для получения водяного газа показан на рис. 97.

8* 000'1

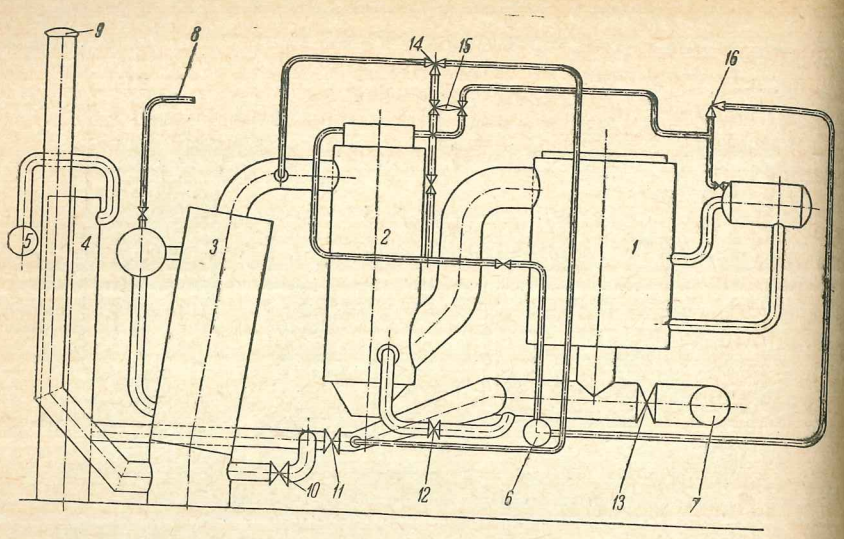


Рис. 95. Установка для получения водяного газа с использованием продуктов воздушного дутья и физического тепла водяного газа при дутье пара снизу

1—генератор, *2*—рекуператор, *3*—котел, *4*—скруббер, *5*—газовая магистраль, *6*—магистраль пара низкого давления, *7*—воздушная магистраль, *8*—паропровод высокого давления, *9*—клапан дымовой трубы, *10*—клапан верхнего газа, *11*—клапан нижнего газа, *12*—клапан вторичного воздуха, *13*—клапан первичного воздуха, *14*—трехходовой паровой клапан, *15*—паровой клапан, *16* - пружинный паровой клапан.

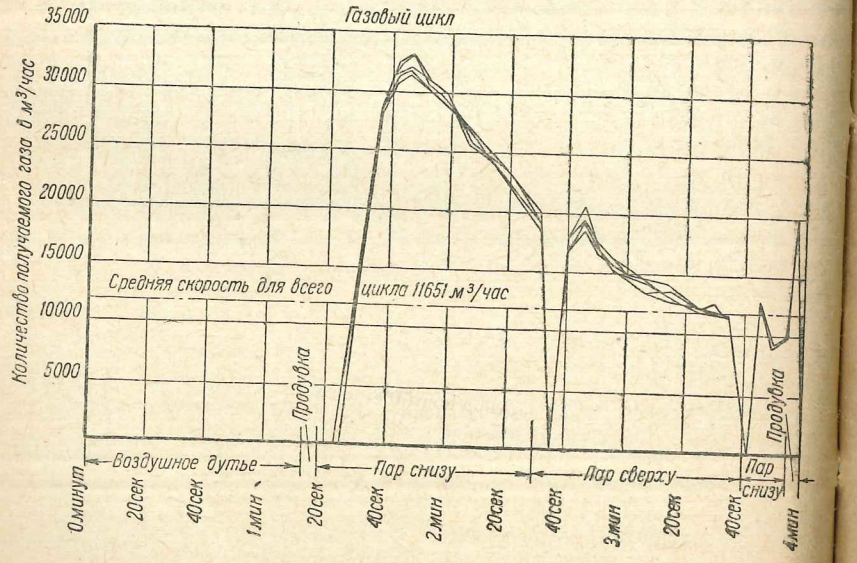


Рис. 96. Изменение количества получаемого газа в течение фаз парового дутья.

Загрузка топлива и удаление золы

Загрузка топлива в генераторах водяного газа раньше производилась во всех установках вручную периодически, в настоящее же время ручная загрузка применяется только в малых генераторах. Промежутки времени между отдельными периодическими засыпками составляют 45—75 мин. При этом состав газа в промежутке между двумя засыпками сильно изменяется; так например при периодической загрузке в генератор 1 *m* топлива в час за 10 мин. до загрузки анализ газа показал: CO_2 — 6%, CO — 37%, H_2 — 53%, N_2 — 4%, и через 10 мин. после загрузки: CO_2 — 4%, CO — 41%, H_2 — 50% и N_2 — 5%. Изменение состава газа вызывается изменением толщины и сопротивления слоя топлива, а также понижением температуры перед загрузкой. В настоящее время в больших установках применяют механические загрузочные приспособления. Они могут быть приспособлены как для периодической, так и для непрерывной загрузки.

Удаление золы представляет в генераторах водяного газа особо трудную операцию.

В период воздушного дутья в генератор подается только воздух и в нижней части генератора развиваются очень высокие температуры, способствующие плавлению золы, а в период парового дутья температуры значительно снижаются, и в случае наличия расплавленного шлака последний превращается в плотную массу.

При ручном способе зола удаляется 2—3 раза в сутки. Для этой цели генератор выключают на $^1/_2$—$1^1/_2$ часа, открывают дверки, служащие для чистки (см. рис. 93), взламывают и удаляют шлак. Вместе со шлаком выгребается и часть топлива, что определяет большую потерю с выгребом. В современных генераторах большой мощности удаление золы и шлака производится непрерывно механическим путем, что способствует более равномерному режиму и устранению потерь. Применяется как сухое золоудаление, так и мокрое. При сухом золоудалении может быть применено более высокое давление (применялось до 2500 *мм* вод. ст.), но в этом случае механизм золоудаления менее доступен и требует останова генератора при выгрузке золы из кармана. Мокрое золоудаление более доступно и не требует остановок генератора; его недочетом являются ограниченность в допустимом давлении и сильные колебания уровня воды при изменениях давления. Применение водяного затвора является более подходящим при производстве карбюрированного водяного газа, при котором работают с меньшими давлениями в целях получения продувочных газов с большим содержанием окиси углерода.

До последнего времени применяли генераторы водяного газа без охлаждающих кожухов, и при этом шлак приплавлялся к кирпичам футеровки. Для устранения этого недочета в генераторах водяного газа начали применять охлаждающие кожухи.

Показанный на рис. 97 генератор представляет собой современную конструкцию генератора водяного газа большого размера (диаметр — 3000—5000 *мм*). Загрузка топлива в этом генераторе производится непрерывно автоматически с помощью приспособления *15*, вращающегося и распределяющего топливо по сечению генератора. Для удоб-

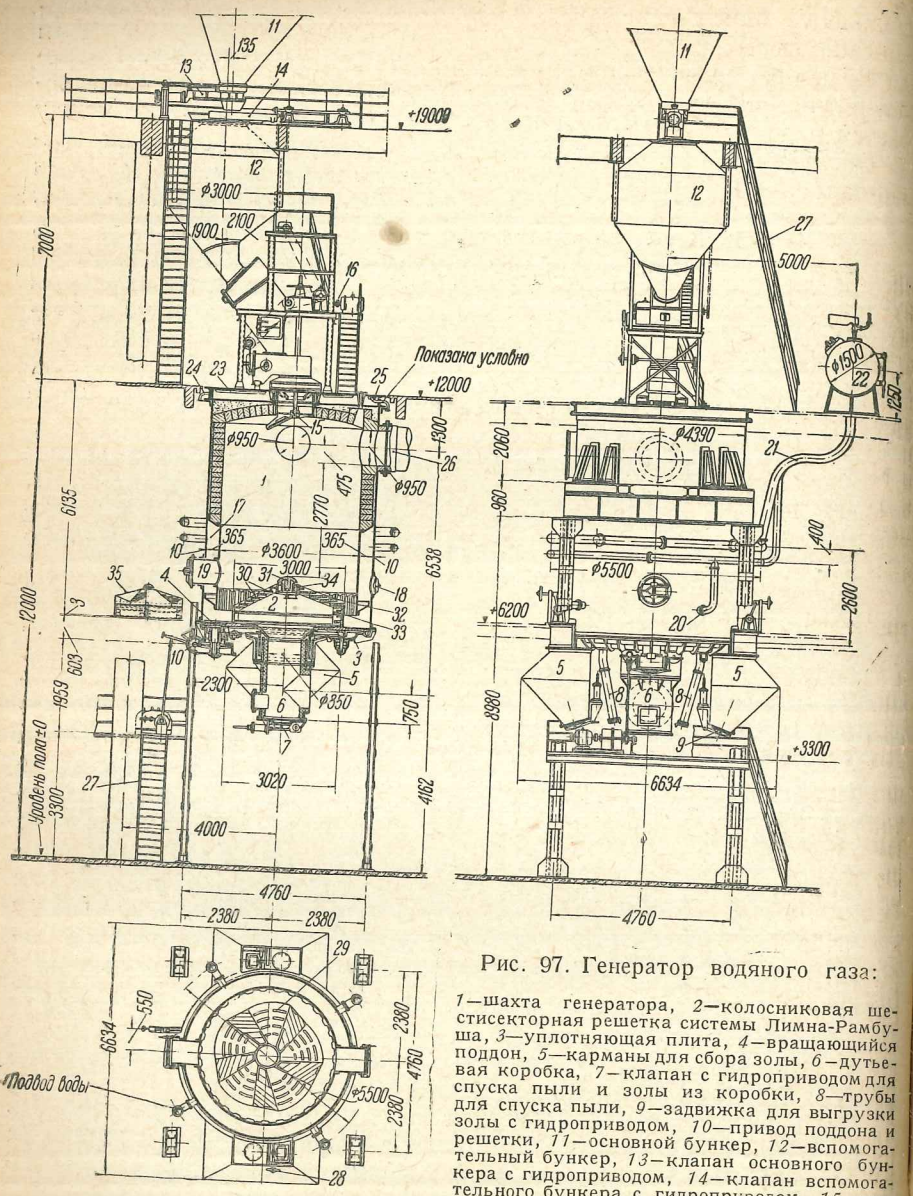


Рис. 97. Генератор водяного газа:

1—шахта генератора, *2*—колосниковая шестисекторная решетка системы Лимна-Рамбуша, *3*—уплотняющая плита, *4*—вращающийся поддон, *5*—карманы для сбора золы, *6*—дутьевая коробка, *7*—клапан с гидроприводом для спуска пыли и золы из коробки, *8*—трубы для спуска пыли, *9*—задвижка для выгрузки золы с гидроприводом, *10*—привод поддона и решетки, *11*—основной бункер, *12*—вспомогательный бункер, *13*—клапан основного бункера с гидроприводом, *14*—клапан вспомогательного бункера с гидроприводом, *15*—распределитель топлива (питатель), *16*—привод питателя, *17*—охлаждающий кожух, *18*—люк кожуха, *19*—лаз, *20*—питательная труба кожуха, *21*—отводящая пар труба, *22*—паросборник, *23*—охлаждаемая водой крышка, *24*—подвод воды в крышку, *25*—отвод воды, *26*—газоотводный штуцер, *27*—лестницы для обслуживания, *28*—регулятор положения ножа для удаления золы, *29*—сектора решетки с отверстиями, *30*—колосники решетки, *31*—головка решетки, *32* и *33*—балки с приливами для плитчатых колосников, *34*—букса для головки решетки, *35*—внешний вид пятисекторной решетки со сплошными секторами

ства монтажа загрузочного приспособления и обслуживания свод генератора перекрыт металлической, охлаждаемой водой, крышкой. Подробнее приспособление для загрузки топлива и удаления золы описано выше.

В целях значительной интенсивности и бесперебойности работы генератор снабжен охлаждающим кожухом, вверху которого собирается используемый для дутья пар.

Обслуживание решетки и шуровка генератора в случае сильного зашлакования возможны через имеющийся лаз.

Данные о работе генераторов водяного газа и использовании тепла в них

Интенсивность газификации в генераторах водяного газа составляет в настоящее время для кокса 600—800 и для антрацита — 300—400 *м³/м² час*. Унос мелочи и пыли, а отчасти расход энергии ограничивают давление дутья пределом в 750—1000 *мм*. Высота слоя топлива обычно не превышает 2 *м*.

Средний состав водяного газа приведен в табл. 1.

Водяной газ и продукты воздушного дутья на пути от генератора отдают свое физическое тепло в специальных приспособлениях, причем продукты воздушного дутья дожигаются. Вводимый в генератор пар сильно перегревается.

Использование тепла топлива и пара, введенных в генератор, в химическом тепле водяного газа составляет в среднем 50—65%; много тепла теряется с продуктами горячего дутья — 20—28%.

В табл. 49 приведен примерный тепловой баланс (128) генератора водяного газа.

Получение водяного газа из топлив с высоким содержанием летучих

Для получения водяного газа применяют преимущественно кокс, иногда антрацит. Применение топлив со значительным содержанием летучих связано с потерей части летучих в период воздушного дутья.

Кроме того коксовый остаток молодых топлив обладает высокой реакционной способностью, что способствует получению в период воздушного дутья больших количеств окиси углерода.

Стремление заменить антрацит и кокс битуминозным топливом имело место давно, что преследовало цели удешевления стоимости газа и использования менее дефицитных топлив.

Часть методов, предложенных для получения водяного газа из битуминозных топлив, предусматривает разложение в генераторе продуктов сухой перегонки и следовательно получение газа, приближающегося по теплотворной способности к обычному водяному.

По методу, предложенному Штрахе, воздухом продувается нижняя часть слоя топлива, и продувочные газы дожигаются в камере с насадкой — регенераторе; через некоторое время при сильном разогреве слоя кокса в генератор сверху подается прошедший через регенератор и сильно перегретый пар. Проходя через свежезагруженное топливо, пар производит сухую перегонку топлива и, смешанный с продуктами сухой перегонки проходит сильно раскаленный слой кокса, в котором эти продукты разлагаются, а пар образует

Тепловой баланс генератора водяного газа *Таблица 49*

Наименование статей	%
Приход тепла	
Кокс	92,52
Пар	7,35
Воздух	0,13
Всего	100,00
Расход тепла	
Теплотворная способность водяного газа	57,81
Теплосодержание водяного газа	3,23
Теплотворная способность продувочных газов	18,95
Теплосодержание продувочных газов	9,33
Теплотворная способность горючего в провале	4,54
Теплотворная способность пыли, уносимой с газом	0,33
Теплосодержание остатков и пыли	0,33
Теплосодержание водяного пара	2,20
Потеря в окружающую среду и неучтенные потери	3,28
Всего	100,00
Приблизительная средняя температура продувочных газов (в °С)	700
Приблизительная средняя температура водяного газа (в °С)	503

водяной газ. Разложение смолистых веществ происходит достаточно полно. Для газификации этим методом пригодны неспекающиеся угли.

При опытах, произведенных с германским каменным углем (верхнесилезским) с содержанием углерода в 52% и теплотворной способностью в 5784 *кал/кг* и с бурым углем, содержавшим 42,9% углерода, 19,6% влаги и 8,1% золы, был получен газ со средней теплотворной способностью в 2500 *кал/м*³. Расход топлива на 1 *м*³ газа составил 0,6 *кг* каменного угля и 1 *кг* бурого угля. К. п. д. газификации был равен в случае каменного угля 72% и в случае бурого угля—66%.

По способу Крамера и Арта [129], газификация битуминозного топлива, предусматривающая разложение в генераторе продуктов сухой перегонки, протекает следующим образом. Два генератора соединены с общим регенератором. Воздушное дутье производится одновременно в обоих генераторах, причем продукты воздушного дутья дожигаются в регенераторе. Паровое дутье производится попеременно — то в один, то в другой генератор. Получившийся в одном генераторе водяной газ, смешанный с продуктами сухой перегонки, сжигается в регенераторе, а продукты горения пропускаются через второй генератор сверху вниз, где они превращаются в горючий газ. Этот способ себя не оправдал.

Можно продукты парового дутья не подвергать сжиганию, а только сильно подогревать в регенераторе для разложения углеводородов. Загрузка топлива в этих случаях идет в шахту, через которую должно быть пущено паровое дутье.

Известно получение водяного газа из битуминозных топлив при работе с обращенным направлением газов в период и воздушного и парового дутья. В других конструкциях предусматривался пропуск газа и паров, полученных из битуминозного топлива, через отдельную шахту, в которой газифицировался кокс.

Условия рынка вынуждали за границей к переходу в установках водяного газа от работы на коксе к работе на битуминозном топливе. Переход потребовал изменения периодов горячего и холодного дутья для лучшего использования тепла продувочных газов и лучшего распределения тепла в слое топлива.

Повышение экономичности газификации в частности достигалось путем примешивания к водяному газу продуктов воздушного дутья в течение небольшой последней части периода (последние 10—17 сек.), когда в газах имеется высокое содержание окиси углерода вследствие высокой температуры слоя и значительной активности топлива, большей, чем каменноугольного кокса. Эти продукты воздушного дутья могли получаться также и путем подачи воздуха в этот небольшой период сверху вниз, что способствует более равномерному распределению температур в слое топлива.

При работе с частичным обратным воздушным дутьем отдельные периоды процесса протекают в следующей последовательности: прямое воздушное дутье, обратное воздушное дутье, прямая подача пара (прямое газование), обратное газование, прямое газование и продувка. Продолжительность обратной подачи пара составляет от $^1/_3$ до $^2/_5$ всего периода газования.

Разложение смолистых веществ, остающихся в газе в период подачи пара, на постоянные газы может быть достигнуто путем пропуска газа по выходе из генератора через камеры, заполненные сильно разогретой насадкой (перегреватели, регенераторы, фиксаторы, крекеры). Разогрев этих камер производится путем дожигания в них продуктов горячего дутья.

При переходе с работы на коксе к работе на битуминозных углях оказалось, что генераторы, особенно при больших размерах, работают не всем сечением и что середина слоя по оси генератора представляет собой мертвый, плохо прококсованный столб топлива. Для устранения этого недочета весьма полезным оказалось устройство в середине генераторов шамотных сердечников (кернов) или перегородок.

Опыт показал, что уголь, применяющийся для получения водяного газа, не должен быть сильно спекающимся и не должен содержать пыли; давление дутья не должно быть высоким — более 500—550 *мм* — во избежание сильного уноса.

Обладающий большой реакционной способностью полукокс молодых топлив может разлагать водяной пар с образованием углекислоты при низких температурах. Гвоздьем [130] были проведены опыты по газификации на водяной газ при низких температурах (800°) богемского бурого угля. Количество подаваемого пара, перегретого

до 450°, было велико и составляло 2 *кг/м³* газа. Газифицировался богемский бурый уголь с влажностью в 38,5%, зольностью в 7,2% и низшей теплотворной способностью в 2540 *кал/кг*. Продолжительность горячего дутья составляла 2 мин. и холодного — 8 мин. Состав газов воздушного дутья был следующий: CO_2 — 16,2%, C_mH_n — 0,1%, O_2 — 0,1%, CO — 4,2%, H_2 — 6% и CH_4 — 1,8%. Состав водяного газа: CO_2 — 24,8%, C_mH_n — 0,6%, O_2 — 0,1%, CO — 7,9%, H_2 — 56,3%, CH_4 — 6,3% и N_2 — 4%. На 1 *м³* водяного газа было израсходовано 1,45 *кг* бурого угля и 2,3 *кг* водяного пара. Количество получаемого в период газования водяного газа постепенно уменьшалось и составляло в первую минуту 24,2% и в последнюю — 6,1%.

Генератор имел диаметр в 730 *мм* и высоту — 4200 *мм*. Интенсивность газификации составляла 160 *кг/м² час*.

Подобный способ газификации, связанный с потерей в период воздушного дутья значительной части летучих, может дать следующие преимущества: получение газа с повышенным содержанием водорода и избежание образования в период воздушного дутья больших количеств окиси углерода и шлакования.

Получение водяного карбюрированного газа

Водяной газ может быть карбюрирован или парами бензина и бензола (холодная карбюрация) или нефтяным газом (горячая карбюрация). Карбюрация газа повышает теплотворную способность газа и его светимость. Карбюрация может преследовать цели удешевления передачи газа, приближения его теплотворной способности к определенной норме (стандартный газ), а также улучшения его использования в печах, для которых часто требуется возможно более лучеиспускающее пламя. Применение имеет преимущественно горячая карбюрация, для которой используется тепло, содержащееся в продувочных газах. Последние дожигаются в карбюраторе (крекер, фиксатор, перегреватель) — камере с огнеупорной насадкой, в результате чего насадка разогревается до температуры 700—900°. При проходе водяного газа через камеру в нее вспрыскивается нефтяное топливо, разлагающееся под влиянием нагрева на более легкие углеводороды — постоянные газы (метан, этилен и др.) и летучие жидкости, обладающие высокой теплотворной способностью. Получаемый газ (смесь газов) называется карбюрированным водяным газом.

Карбюрации может быть подвергнут также смешанный генераторный газ. В этом случае разогрев карбюратора осуществляется за счет сжигания осадков, выделяющихся в период впуска жидкого топлива, и за счет сжигания в насадке газа или другого топлива.

На рис. 98 представлена схема установки для получения водяного карбюрированного газа. Продукты горячего дутья в этой установке дожигаются в заполненных насадкой карбюраторе и перегревателе. Тепло газов, выходящих из перегревателя, используется в котле для получения пара. При вдувании в генератор водяного пара и получении водяного газа в карбюратор вспрыскивается нефтетопливо, разлагающееся в карбюраторе и перегревателе с получением нефтяного газа. Полученный водяной газ поступает для охлаждения и очистки в скруббер и оттуда через коллектор — в газгольдер.

Распыление нефтетоплива производится или паром или механически.

Нефтетопливо представляет собой нефть с отогнанными газолиновыми и керосиновыми фракциями или масла.

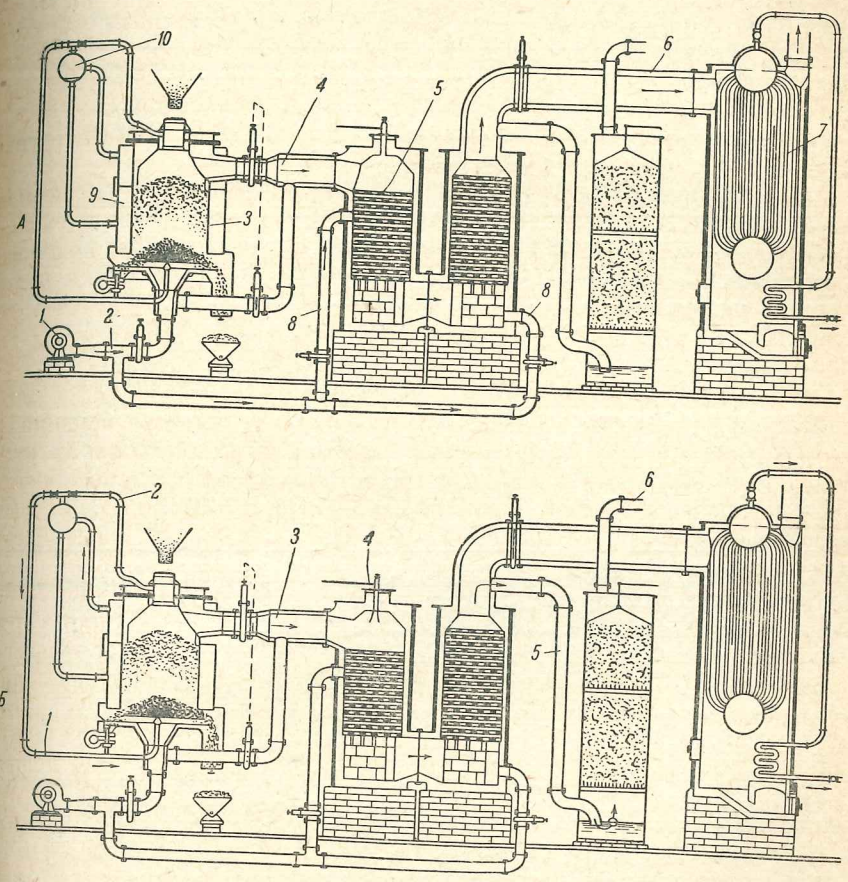


Рис. 98. Установка для получения водяного карбюрированного газа:

А—горячее дутье: *1*—вентилятор, *2*—воздухопровод, *3*—генератор, *4*—ход продуктов горячего дутья, *5*—карбюратор, *6*—ход отходящих газов, *7*—паровой котел, *8*—подвод воздуха для дожигания продуктов воздушного дутья, *9*—охлаждающий кожух, *10* паросборник. *Б*—паровое дутье: *1*—паропровод для подачи пара снизу, *2*—паропровод для подачи пара сверху, *3*—ход водяного газа, *4*—подача нефти в карбюратор, *5*—газопровод к скрубберу, *6*—отвод карбюрированного водяного газа

Атмосфера водяного газа способствует получению при разложении нефтетоплива продуктов с более высокой теплотворной способностью. При процессе карбюрирования водяного газа водяной пар, содержащийся в газе, частично взаимодействует с коксом и смолой, выделяющимися при разложении нефтетоплива, и образует водяной газ; водород газа также взаимодействует в некотором количестве с па-

рами нефтетоплива. Количество образующегося нефтяного кокса составляет 5—15% и образующейся смолы — 20—30% от веса нефтетоплива.

Температура в карбюраторе составляет 730—760°. Более резкие колебания имеют место только вверху насадки. При более высокой температуре нефтетопливо разлагается с выделением углерода и нафталина, а при более низкой — увеличивается количество образующихся смол и неразложенного нефтетоплива. Углерод и нафталин засоряют хода, а смола и нефтетопливо образуют с водой трудно отделяемую эмульсию. В обоих случаях уменьшается количество тепла, содержащегося в газе.

Количество газа, получающегося при разложении нефтетоплива, составляет 0,5—0,6 *м³/кг*.

На кирпичной насадке карбюратора в месте подачи нефтетоплива (вверху) образуется коксовый нагар, частично выгорающий в период горячего дутья. Отложения кокса и сильное разрушение кирпичей вверху насадки вызывают необходимость в периодической их чистке и замене разрушенных кирпичей новыми. Иногда применяют карбюраторы без насадки. В этом случае требуется очень тонкое распыление нефтетоплива.

Продукты горячего дутья часто содержат значительно больше тепла, чем требуется для поддержания необходимой температуры в карбюраторе и перегревателе. Часть тепла может быть использована также в котле-утилизаторе, но это не уменьшает количества кокса, которое должно быть загружено в генератор для производства определенного объема водяного газа. Большее количество тепла может быть использовано и притом с возвратом тепла в генератор в случае применения обратного дутья пара, перегретого в карбюраторе и перегревателе (back-run process) без карбюрации в эту фазу (рис. 99).

Примерный состав карбюрированного водяного газа: CO_2 — 5,3%, C_mH_n — 5,9%, CO — 34,7%, H_2 — 38,3%, CH_4 — 10%, O_2 — 0,3% и N_2 — 5,5%; высшая теплотворная способность — 4260 *кал/м³*.

При карбюрировании водяного газа может повышаться содержание в газе сероводорода, а также могут вводиться сернистые соединения, не содержавшиеся совсем в водяном газе (CS_2, COS, меркаптаны), что усложняет очистку газа.

Применение в генераторах для получения карбюрированного водяного газа обратного тока пара с прохождением последнего через перегреватель и карбюратор преследует иногда цель очистки последних от оседающего в них коксового нагара.

Газование обратным током с пропуском пара через карбюратор дает возможность уменьшить удельный вес водяного газа, что иногда требуется для удовлетворительной работы горелок, приспособленных для коксового газа. На изменение удельного веса газа особенно влияет содержание в газе водорода. Давно замечено, что водяной газ, получаемый при обратном газовании, имеет более высокое содержание водорода, чем при прямом. Так Гвоздь [129] приводит для сравнения следующие составы газа. При прямом газовании: CO_2 — 5,3%, O_2 — 0,2%, CO — 38,8%, CH_4 — 1,8%, H_2 — 48% и N_2 — 5,9%; уд. вес — 0,53. При обратном газовании: CO_2 — 4,7% , O_2 — 0,3%, CO — 38,1%, CH_4 — 2,1%, H_2 — 53,6% и N_2 — 1,2%; уд. вес — 0,50. Это уменьшение веса объясняется захватыванием водяным паром при обратном газовании из карбюратора паров нефтетоплива, разлагающихся в слое топлива с образованием водорода и метана. Добавка нефтетоплива к водяному пару при обратном газовании может дать значительное снижение веса газа.

Гвоздь приводит следующий состав водяного газа, полученного при добавке к пару нефтетоплива в период обратного дутья: CO_2 — 1,2%, C_mH_n — 1,8%, CO — 21%, CH_4 — 18,1%, H_2 — 57,5% и N_2 — 0,4%.

При получении карбюрированного водяного газа иногда газ обратного парового дутья (способ Крисмана) не направляют в карбюратор во избежание сильного охлаждения последнего, так как водяной газ, получающийся при обратном ходе, имеет более низкую температуру, чем при прямом ходе.

Данные о работе установок для получения водяного карбюрированного газа и использовании тепла в них

При испытании установки для производства водяного карбюрированного газа Американским институтом инженеров-газовиков были получены следующие результаты (табл. 50) [128].

Таблица 50

Данные испытания установки водяного карбюрированного газа (расчет на 1000 *м³* карбюрированного газа)

Данные	Количество
Загружено кокса (в *кг*)	565
» с коксом углерода (в *кг*)	482
Подано масла для карбюрации (в *л*)	247
Содержание углерода в масле (в *кг*)	217
Теплотворная способность карбюрированного газа (в *кал/м³*)	4310
Количество водяного газа (в *м³*)	840
Получено смолы (в *л*)	33,4
Подано пара для генераторов (в *кг*)	464
Подано пара для воздуходувок (в *кг*)	200
Подано пара для эксгаустеров и насосов (для масла и котлов) (в *кг*)	303
Получено пара в утилизационном котле (в *кг*)	978
Общий к. п. д. (в %)	67,1

В табл. 51 приведен тепловой баланс, составленный на основании результатов проведенных опытов.

Баланс тепла при производстве водяного карбюрированного газа

Таблица 51

Приход		Расход	
Наименование статей	%	Наименование статей	%
Теплотворная способность загруженного в генератор кокса	59,52	Теплотворная способность карбюрированного газа	62,77
Теплотворная способность карбюрационного масла	40,42	Теплосодержание газа	4,13
Теплосодержание воздуха	0,06	Теплосодержание неразложившегося пара	1,92
		Теплотворная способность смолы	6,31
		Теплосодержание смолы	0,27
		Теплотворная способность газов горячего дутья	6,71
		Теплосодержание газов горячего дутья	4,31
		Тепло, потерянное при получении пара в котле	5,04
		Тепло, потерянное с продувочной водой из котлов	0,04
		Теплотворная способность горючего в остатках	4,00
		Теплосодержание золы и шлака	0,21
		Неучтенные потери	4,29
Всего	100,00	Всего	100,00
		К. п. д. утилизационных котлов	43,4

Получение карбюрированного водяного газа из топлив с высоким содержанием летучих

Карбюрированию подвергают водяной газ, получаемый как из кокса или антрацита, так и из битуминозного угля.

На рис. 99 представлена установка Уитвелла для получения водяного карбюрированного газа из битуминозного топлива или из кокса. В этой установке предусмотрено получение водяного газа также при обратном дутье паром. Целью обратного дутья была очистка насадки карбюратора и перегревателя от сажи, газифицировавшейся при пропускании пара. Это позволило применить для карбюрации низкосортные нефтетоплива и для газификации каменные угли, смолистые вещества которых также значительно засоряют насадку. Кроме того это увеличило количество тепла, возвращаемого в генератор для получения водяного газа.

Работа установки Уитвелла протекает следующим образом. В период воздушного дутья воздух проходит через воздухопровод и открытый клапан в генератор *1* и через трубопровод *2* и клапан *3* в карбюратор *4*. Газы через трубопровод *5* проходят в карбюратор *4* и через трубопровод *6* в перегреватель *7*, где отдают свое тепло насадке карбюратора и перегревателя, после чего отводятся через трубу *8* в атмосферу. В период газования снизу вверх через клапан *10* и паропровод *9* в генератор снизу пускают пар. Полученный водяной газ проходит карбюратор и перегреватель, причем возможно газ карбюрировать, для чего через клапан *11* подается в карбюратор нефтетопливо, распыливаемое специальным приспособлением *12*. Водяной газ отводится через трубопровод *13* и гидравлический клапан *14* в магистральный трубопровод. В период газования сверху вниз открывают

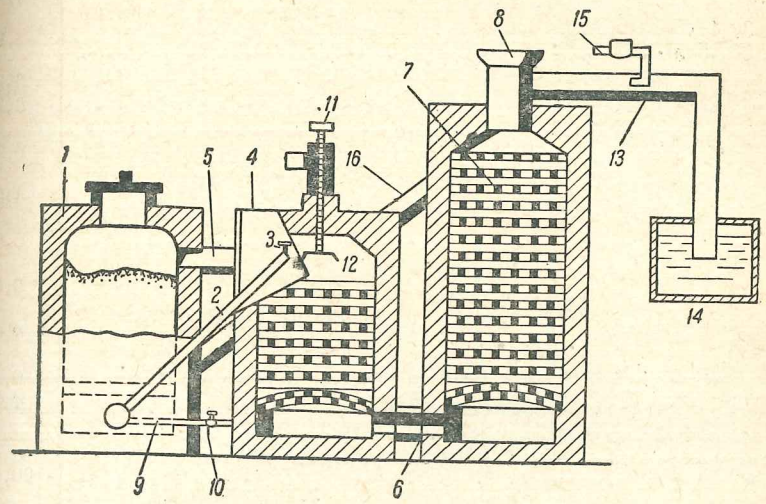


Рис. 99. Установка Уитвелла для получения водяного карбюрированного газа

на паропроводе вентиль *15*, и пар через трубопровод *13* попадает в перегреватель *7* и карбюратор *4*. Сильно перегретый пар очищает насадку от сажи и проходит в генераторе сверху вниз, образуя водяной газ. Последний через трубопровод *16* попадает в гидравлический затвор *14*. Трубопровод *16* соединен с трубопроводом *13*, и часть получающегося в период обратного дутья газа может увлекаться обратно в генератор, что связано с увеличением количества использованного в перегревателе и карбюраторе тепла для возврата в генератор.

Для сравнения показателей работы на коксе и битуминозном угле Гвоздь [129] приводит таблицу тепловых балансов, составленную в расчете на 100 $м^3$ карбюрированного водяного газа с теплотворной способностью в 4710 *кал*/$м^3$ (табл. 52).

В зависимости от количества нефтетоплива, вводимого в карбюратор, может изменяться теплотворная способность получаемого газа. Обычно она не превышает 5000 *кал*/$м^3$.

Таблица 52

Тепловые балансы генераторов при работе на коксе и битуминозном угле

Статьи \ Топливо	Кокс		Битуминозный уголь	
	кал	%	*кал*	%
Приход				
Теплотворная способность топлива:				
49,4 *кг* · 7088 *кал*	350 000	50,2	—	—
43,3 *кг* · 7882 *кал*	—	—	341 000	46,1
Тепло, внесенное карбюрационным маслом:				
33,4 *л* · 9320 *кал*	311 300	44,6	—	—
38,25 *л* · 9320 *кал*	—	—	356 500	48,2
Теплосодержание пара:				
56,2 *кг* · 645 *кал*	36 250	5,2	—	—
64,3 *кг* · 645 *кал*	—	—	41 500	5,7
Всего	697 550	100,0	739 000	100,0
Расход				
Теплотворная способность карбюрированного водяного газа	471 000	67,6	471 000	63,6
То же смолы	57 000	8,2	67 000	9,0
Теплосодержание водяного газа, смолы и пара	50 000	7,2	63 600	8,6
Теплосодержание и теплотворная способность газов горячего дутья	30 400	4,3	39 000	5,4
Тепло, использованное в паровом котле	26 000	3,7	20 000	2,7
Потери горючего в золе	12 700	1,8	10 000	1,4
Потери в окружающую среду	24 700	7,2	24 700	9,3
Остаток (прочие неучтенные потери)	25 750		43 700	
Всего	697 550	100,0	73 9000	100,0

Получение водяного газа с высоким содержанием водорода

В целях получения газа с высоким содержанием водорода для синтеза жидких топлив по способу Фишера в генераторы водяного газа подают смесь водяного пара и коксового газа.

Применяется следующее оборудование: генератор периодического действия, камера с насадкой, котел-утилизатор, гидравлический затвор или электрофильтр и скруббер.

Процесс состоит из нескольких стадий:

1. Горячее дутье: воздух вдувается в нижнюю часть генератора и СО продуктов дутья сжигается в камере с насадкой, где используется большая часть тепла; остальное тепло используется в котле-утилизаторе.

2. Газование:

а) дутье сверху — коксовальный газ (один или большей частью в смеси с паром) подается в нижнюю часть камеры с насадкой. Он нагревается и разлагается при соприкосновании с раскаленным топливом, давая сажу, отлагающуюся в генераторе на коксе, и водород. Сажа газифицируется на водяной газ парами воды во время дутья сверху или снизу; смесь газов отводится внизу генератора, проходит гидравлический затвор и скруббер, где промывается водой;

б) дутье снизу — водяной пар вводится в нижнюю часть генератора; получающийся водяной газ проходит камеру с насадкой и котел-утилизатор, где отдает свое физическое тепло, а затем гидравлический затвор и скруббер.

При применении коксового газа [131] были получены следующие показатели: топливо — металлургический кокс, содержание нелетучего углерода — 81,2%; состав коксового газа: CO_2 — 2%, C_mH_n — 1,3%, CH_4 — 26,2%, CO — 5,2%, H_2 — 59,4% и N_2 — 5,9%. Расход на 100 *м*³ газа (15° и 760 *мм*): нелетучего углерода — 28,5 *кг*, коксового газа — 29 *м*³. Состав полученного газа: CO_2 — 2,3%, CH_4 — 2,4%, CO — 30,3%, H_2 — 60% и N_2 — 5%.

Водяной газ с повышенным содержанием водорода получают также в некоторых аппаратах, работающих непрерывным процессом-Дидье и др.

Непрерывное получение водяного газа

Установки для получения водяного газа работают по принципу периодического производства, что имеет следующие недостатки:

1. Требуется наличие многочисленных дорогих клапанов для переключения циклов.

2. Управление генераторами является сложным и требуется дорогостоящая его автоматизация.

3. Производство газа протекает неравномерно в силу постепенного падения температуры в слое, что обусловливает ухудшение состава газа к концу периода газования и уменьшение количества разлагаемого пара.

4. Коэфициент полезного действия и использования тепла топлива в этих установках, даже наиболее совершенных, ниже, чем в обычных генераторных установках.

5. Установка не используется в период воздушного дутья и перестановки клапанов.

Указанные причины в соответствии со все растущим потреблением водяного газа побудили настойчиво искать возможности непрерывного получения водяного газа.

Потребное для целей получения водяного газа тепло может быть введено в генератор с помощью высоко нагретого водяного пара, частичной газификацией топлива кислородом, добавляемым к водяному пару, обогревом шахты снаружи или изнутри (например электрическим током) и другими способами.

Подача всего потребного тепла путем одного лишь нагрева водяного газа невозможна и поэтому прибегают также к вводу высоко нагретой смеси водяного пара и части полученного газа.

Следует отметить опыты и успехи, имеющиеся в этой области при пользовании высоко нагретой смесью водяного пара и части газа (Пинч — Гиллебранд), парокислородным дутьем (Винклер) и внешним обогревом генератора (Геллер). Газификация пылевидного топлива в генераторах Геллера и мелкого — в генераторах Винклера описана в разделе о газификации мелкого и пылевидного топлива.

На рис. 100 представлена схема устройства генератора Гиллебранда, предназначенного для получения непрерывным путем водяного газа из дешевых влажных бурых углей и допускающего получение и двойного водяного газа.

Согласно схеме [132, 133], газы из швельшахты *1*, состоящие из смеси газов сухой перегонки и циркуляционного газа и содержащие много водяного пара, проходят электрический смолоотделитель *2* и

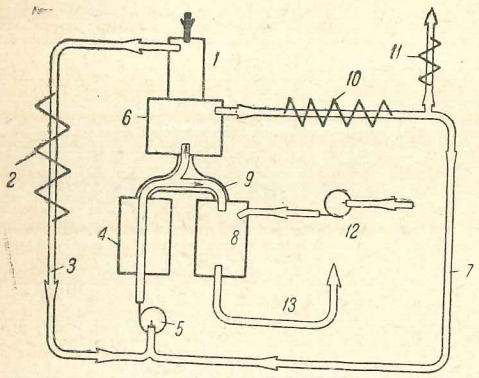


Рис. 100. Схема работы генератора Гиллебранда

подаются потоком *3* в разогретую регенеративную камеру *4* с помощью вентилятора *5*. К этому газу добавляется некоторое количество водяного газа, необходимое для разогрева регенератора (поток *7*). Газы в регенераторе подогреваются от температуры 60—70° до 1250—1300°, после чего поступают частью в генератор *6* и частью в регенератор *8* (поток *9*) для его разогрева. В генераторе при взаимодействии водяного пара подаваемой смеси и углерода топлива происходит образование водяного газа, а также разложение оставшихся в газе после смолоотделителя парообразных веществ и углеводородов. Полученный водяной газ с температурой 700—750° частично направляется через испаритель и промыватель *10* к потребителю (поток *11*) и для подогрева регенератора (поток *7*) и частично в швельшахту *1* для подсушки и сухой перегонки. Воздух для сжигания газа подается в регенератор *8* вентилятором *12*. Продукты горения из регенератора с температурой 200—250° отводятся потоком *13*. По нагреве регенератора *8* и охлаждении регенератора *4* переводятся соответствующие клапаны (на рисунке не показаны), и нагреваемые газы поступают в регенератор *8*, а сжигаемый газ и воздух — в регенератор *4*.

На рис. 101 представлена промышленная установка генератора Гиллебранда.

Брикеты подаются в бункер *1* генератора ковшевым элеватором, причем величина подачи фиксируется автоматическими весами *2*. Топливо равномерно распределяется автоматическим питателем *3* в восьми дестилляционных железных, расположенных кольцом камерах *4*, в которых происходит сухая перегонка топлива за счет тепла части газов, поступающих из камеры газификации, охлаждающихся с 700 до 100°. Из камер сухой перегонки полукокс поступает в шахту

газификации *5*, снабженную 48 отверстиями *13* для ввода подогретого до 1250—1300° циркуляционного газа и пара и вращающейся кольцевой решеткой *6* для удаления золы.

Камеры сухой перегонки и газификации *4* и *5* расположены кольцом, под которым находятся регенеративные камеры *7*; в некоторых из камер сжигается газ для их подогрева, а в некоторых подогреваются циркуляционный газ, водяной пар и газы сухой перегонки, подаваемые кольцевым трубопроводом *10*. Часть подогретого в регенераторах газа подается для разогрева регенераторов, в которых он сжигается за счет специально добавляемого кольцевым воздухопроводом *11* воздуха. Отходящие газы с температурой в 250° отводятся в дымовую трубу боровом *8*. Избыточный водяной газ направляется в газгольдер через штуцер *9*. Управления клапанами связаны между собой и с механизмом, управляемым мотором.

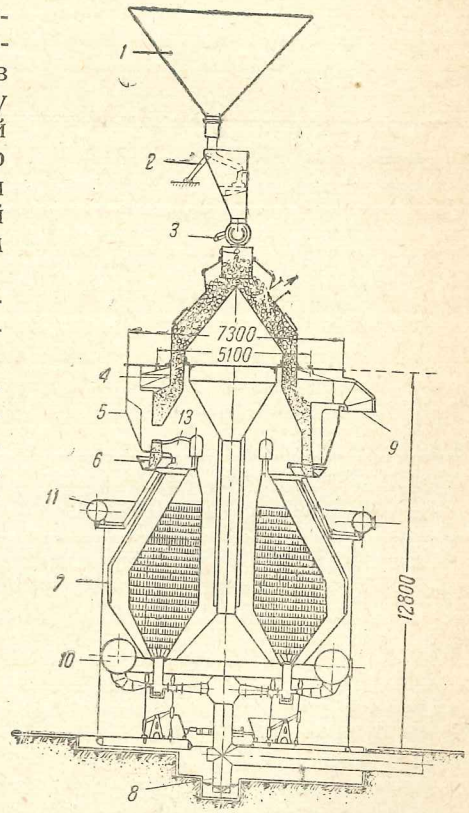


Рис. 101. Установка генератора Гиллебранда для получения водяного газа

Производительность установки составляет 50—55 *т* брикетов бурого угля в сутки. Испытание установки дало следующие показатели. Состав брикетов: влажность — 14,5%, зола — 6,3%, C — 54,5%, H — 3,6%, S — 1% и O + N — 20,1%; теплотворная способность — 4771 *кал/кг*; температура плавления золы в восстановительной среде 1300—1320°. Согласно данным швельанализа, в алюминиевой реторте (до 540° C) выход смолы составлял 7,2%, полукокса — 51,4%. Производительность установки по топливу составляла 57,66 *т* брикетов в сутки, по газу — 58 750 *м*³; выход газа (15°, 760 *мм*) составил 1,02 *м*³/*кг*, смолы — 0,048 *кг/кг*; химический к. п. д. — 49,5%; термический к. п. д. — 59,2%. Расход воды — 11,3 *л/м*³, электроэнергии — 0,027 *квт-ч/м*³ и добавочного пара — 0,25 *кг/м*³. Полученный газ имел следующий состав: CO_2 — 10,1%, CO — 33,6%, H_2 — 54,2%, CH_4 — 0,4% и N_2 — 1,7%; теплотворная способность: высшая — 2743 и низшая — 2480 *кал/м*³.

В настоящее время работает комбинированная установка, состоящая из генераторов водяного и воздушного газа производительностью в 120 000 *м*³ газа в сутки с выходом газа в 1,2—1,3 *м*³/*кг* брикетов,

газифицируемых в генераторе Гиллебранда и генераторе воздушного газа. К. п. д. установки более 70%. Нагревание регенеративных камер производится генераторным газом, подводимым от генератора воздушного газа. Производительность установки удваивается, так как ранее применявшийся для нагревания водяной газ используется как полезный. Бо́льшая часть водяного пара получается в котле-утилизаторе за счет физического тепла водяного газа. Пар используется в турбине, обслуживающей вентиляторы, откуда поступает как добавка в циркуляционный газ.

Этот способ предусматривает газификацию преимущественно низкосортных влажных бурых углей, допускающих широкое использование тепла газов для подсушки и сухой перегонки угля. Циркуляция парогазовой смеси дает возможность путем простой регулировки подвести в слой топлива тепло, необходимое для процесса, при одновременном избежании местных перегревов и шлакования. Выделение процесса сухой перегонки в самостоятельный отдельный цикл дает возможность получить смолу более высокого качества, не загрязненную продуктами разложения смолы, выделяющейся в генераторе. Для получения пара, необходимого в процессе, может быть использована влага топлива, что избавляет от необходимости отвода большого количества загрязненной воды.

Недостатком этого способа помимо трудности достаточно высокого подогрева пара и циркуляционных газов является необходимость в циркуляции очень больших количеств их.

Особый интерес в связи с получением в некоторых производствах отбросного кислорода и с удешевлением способов добычи его приобретает газификация с помощью парокислородного дутья.

Использование электрического тока как источника тепла для газификации возможно в следующих направлениях: применение в шахте сопротивлений, передающих тепло слою топлива, пропускание через слой топлива тока и следовательно использование слоя топлива как сопротивления и передача тепла с помощью вольтовой дуги, образуемой введенными в шахту электродами.

Газогенератор с внутренним обогревом шахты электрическим током по проекту Стассано построен в Италии. Слой топлива в нем является электрическим сопротивлением между электродами, введенными в шахту газогенератора. При прохождении тока через уголь от одного куска топлива к другому образуются светящиеся электродуги, нагревающие уголь и газы до высоких температур.

Применение электрического тока дает возможность достигать требуемого распределения температур в слое и регулировать протекающие в нем процессы. При дешевизне электроэнергии и соответствующей необходимости возможно также повышение температуры газа путем его обогрева [129].

По данным Стассано, на получение 1 $м^3$ водяного газа расходуется 1,6 *квт-ч*. Использование электроэнергии для введения тепла в шахту генератора при газификации вследствие высокой стоимости обычно не имеет применения.

Значительных успехов добились в получении водяного газа непрерывным путем при передаче тепла через стенку. Подобный ячеечный генератор Геллера полупромышленного типа описан в разделе «Газогенераторы для пылевидного топлива». Ниже дается описание прямоточного генератора Дидье промышленного типа, в котором получается газ с соотношением $CO : H_2 = 1 : 2$ для синтеза бензина по способу Фишера.

Установка Дидье [134] (рис. 102) представляет собой комбинацию вертикальной коксовой печи и генератора водяного газа, обоих — непрерывного действия. В генераторе различают шесть зон, находящихся одна над другой: подсушки, предварительной перегонки, коксования при вы-

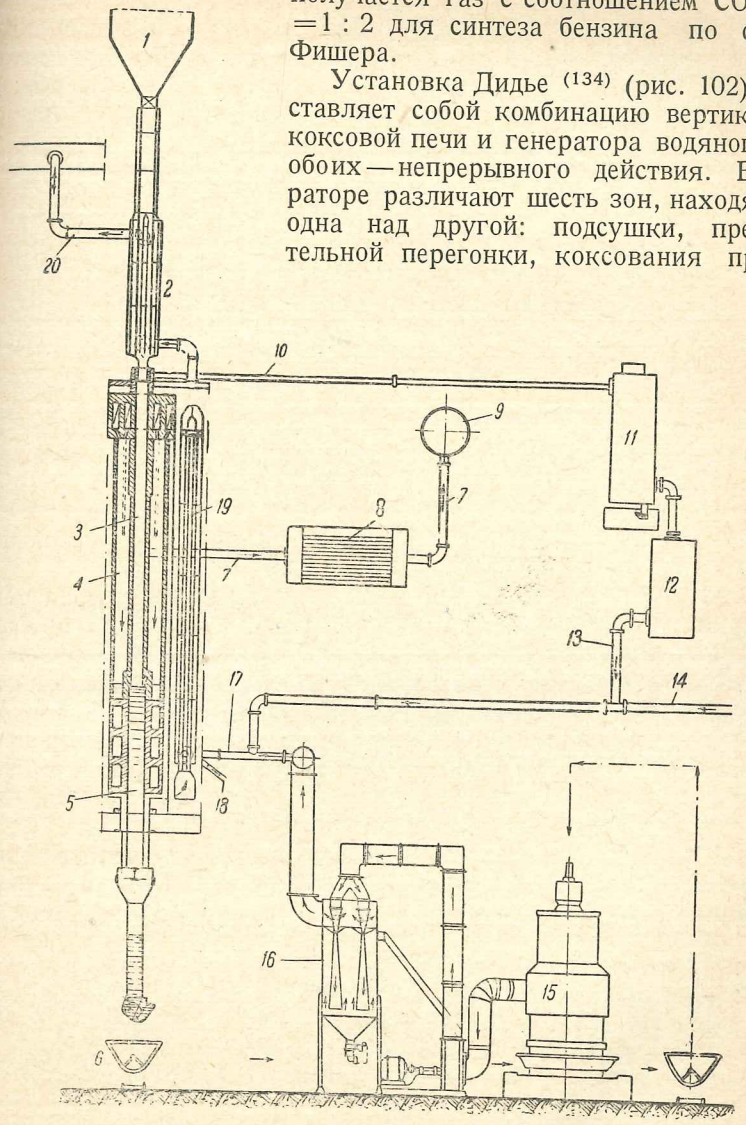


Рис. 102. Установка Дидье:

1—бункер, *2*—сушилка, *3*—камера коксования, *4*—подогревательная камера, *5*—зона получения водяного газа, *6*—вагонетка для остаточного кокса, *7*— отвод газа на синтез, *8*—котел-утилизатор, *9*—барельет, *10*—отвод газов предварительной перегонки, *11*—электрофильтр для очистки газа от смолы, *12*—сероочистка, *13*—отвод очищенного газа предварительной перегонки, *14*—ввод остаточного газа от синтеза, *15*—генератор для получения отопительного газа, *16*—пылеуловитель, *17*—ввод газа для обогрева, *18*—ввод воздуха в камеру обогрева, *19*—рекуператор, *20*—отвод продуктов горения

сокой температуре, конверсии газообразных углеводородов, образования водяного газа и охлаждения кокса.

Зоны сушки и предварительной перегонки образуют одно целое, объединенное в отдельной камере. Камера, в которой объединяются последующие зоны, имеет высоту приблизительно в 4,50 *м*; ширина ее не превышает 45 *см*.

У выхода из камеры сушки и предварительной перегонки получают газ, включающий в себе почти полностью водяной пар и сернистые соединения и часть горючих газов, которые может отдать обрабатываемое топливо. Этот газ очищают, улавливая из него смолу и соединения серы. В смеси с газом из вспомогательного коксового газогенератора он служит для нагревания основного аппарата.

Только вторая камера дает газовую смесь, отвечающую формуле: $CO+2H_2$ и применяемую для получения горючего по методу Фишера. Газы выходят на половине высоты второй камеры. Газ коксования при высоких температурах и газ конверсии движутся в нисходящем направлении, а водяной газ — в восходящем. Вследствие движения газов и топлива в одном направлении аппарат называется прямоточным.

Газообразные продукты коксования при высокой температуре в результате соприкосновения с раскаленным коксом и водяным паром превращаются в смесь CO и H_2, необходимую в процессе Фишера.

Для получения водяного газа у основания нижней камеры вводится водяной пар, перегретый до 400—500°.

Аппарат загружается или пламенным углем с размером кокса в 5—25 *мм* или лигнитовыми брикетами.

Задача заключается в получении такого количества метана, чтобы его пиролиз дал возможность получить требуемую газовую смесь: $CO+2H_2$.

Кокс получается в количестве, достаточном для получения генераторного газа, необходимого для нагрева камеры коксования, в смеси с газом предварительной перегонки.

Пар, необходимый для производства водяного газа, получается из двух источников: первый источник — трубчатый котел, по которому проходят газы, выходящие из камеры коксования и газификации; второй — собственно камера катализа (получение бензина по методу Фишера экзотермично).

Обслуживание генератора Дидье очень сложно ввиду необходимости получить и крекировать такое количество метана, чтобы получилась газовая смесь, отвечающая требуемому составу: $CO+2H_2$, а также получить удовлетворительный по качеству и количеству кокс, предназначенный для производства газа, необходимого для нагревания печей Дидье.

К. п. д. этого аппарата достигает 75%.

Установка Дидье состоит из ряда печей этого образца, соединенных в одну батарею. Например дрезденская установка, рассчитанная на выход 75 000 $м^3$ газа в день, состоит из 24 камер.

Шмидтом и Грю [66] предложен генератор для непрерывного получения водяного газа из буроугольного кокса, отличающийся от обычного генератора обогреваемой средней частью, которую можно сконструировать как пучок труб. Кокс подогревается в верхней части поднимающимся газом и попадает в трубы, которые нагреваются извне и в которых он газифицируется при помощи идущего навстречу водяного пара. Подогретый водяной пар вдувается в слой золы под пучком труб. Зола непрерывно удаляется.

Имеются также предложения передачи тепла, необходимого для проведения процесса получения водяного газа, замкнутым током расплавленного шлака, нагреваемого за пределами генератора (газификация пылевидного топлива в горизонтальной канальной печи, на дне которой находится шлаковая ванна), а также расплавленными металлами [129].

11. ГАЗОГЕНЕРАТОРЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДВОЙНОГО ВОДЯНОГО ГАЗА

Принцип устройства

Одной из причин, препятствующих в отдельных случаях распространению водяного газа, является отсутствие кокса или антрацита. Попытки получения водяного газа из топлив с высоким содержанием летучих с сохранением последних делались давно в целях применения более дешевых топлив, обогащения газа, улавливания продуктов сухой перегонки и соединения в одном аппарате процессов коксования и получения водяного газа. Впервые эта проблема была разрешена Штрахе, создавшим генератор для получения двойного газа — газа, представляющего собой смесь водяного и перегоночного газов. Генератор двойного газа снабжен в верхней части ретортой, в которой прогревается свежезагруженное топливо, из которого при этом выделяются продукты сухой перегонки.

Продукты воздушного дутья не проходят через слой свежезагруженного топлива и поэтому увлекают лишь небольшое количество летучих.

В первоначальной конструкции газы, получавшиеся при продувании воздуха снизу генератора, сжигались в верхней части генератора, и благодаря выделяющемуся при этом теплу реторта сильно прогревалась через стенки. Воздух для сжигания газов подавался через щели в верхней части генератора.

В результате перегонки из реторты вниз опускался полукокс, а газы и пары сухой перегонки отводились при воздушном дутье вблизи загрузочной коробки, причем давление у места их отвода регулировалось таким образом, чтобы через это отверстие не выделялись продукты воздушного дутья.

После разогрева содержимого генератора и реторты, так же как и при получении водяного газа, пускался снизу пар; получаемый водяной газ проходил через реторту, где выделялись продукты сухой перегонки из топлива, и смешивался с ними, образуя двойной газ.

При опытах обнаружилось, что передача тепла через стенки реторты недостаточно интенсивна. Поэтому в более поздних конструкциях (рис. 103) газы горячего дутья обогревают реторту лишь за счет

своего физического тепла, а дожигание их производится в специальном теплообменнике, служащем для сильного перегрева пара, подаваемого в генератор; в этом случае тепло газов горячего дутья используется лучше. Как видно из рисунка, установка состоит из генератора *1*, снабженного ретортой *2*, пароперегревателя *3* и испарителя *4*. Газы горячего дутья выходят из генератора *1*, обогревают снаружи реторту *2*, попадают при открытом клапане в перегреватель *3*, дожигаются в нем за счет воздуха, подаваемого вентилятором *5* через трубопровод *6*, отдают часть своего тепла насадке и поступают в испаритель *4*, в котором также отдают часть своего тепла насадке и выходят

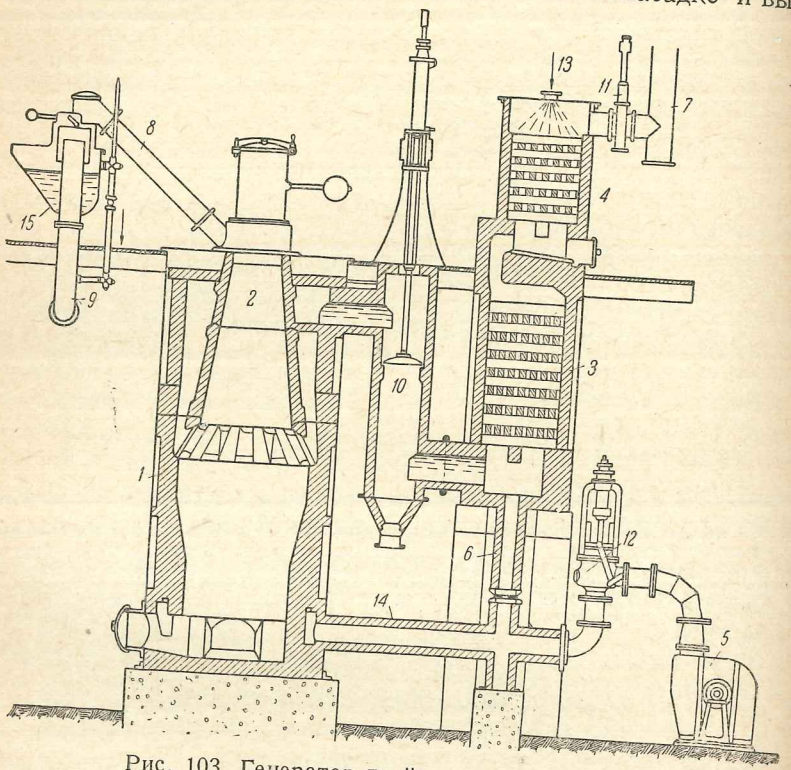


Рис. 103. Генератор двойного водяного газа

в дымовую трубу *7*. Выделяющиеся в период воздушного дутья продукты сухой перегонки из реторты по обводному газопроводу могут поступать в газопровод *9* к очистной установке.

Перед пуском пара закрываются клапаны: на газопроводе *10*, на воздухопроводе *12*, на дымоходе *11* и открывается клапан, перекрывающий газопровод *9*. В испаритель *4* подается распылителем *13* вода, испаряющаяся на сильно разогретой насадке, и водяной пар через перегреватель *3* и ходы *6* и *14* попадает в газогенератор *1*, где в нижней части происходит получение водяного газа, а в верхней — сухая перегонка топлива. Полученный двойной газ через газопровод *8* и гидравлику *15* попадает в газопровод *9* и направляется в газо-

очистительную установку. При значительном охлаждении слоя и уменьшении разложения пара вновь пускают воздушное дутье.

В других генераторах для двойного газа процесс швелевания происходит в швельшахте, надстроенной над корпусом генератора. Газы горячего дутья отводятся ниже основания швельшахты и используются в других устройствах. Для достаточного подогрева загруженного топлива при паровом дутье вводится соответственное избыточное количество перегретого водяного пара. Подобные конструкции проще и дешевле. Они также позволяют избегать ремонтов, связанных с применением реторт, и чисток ходов для продуктов воздушного дутья.

В новейших крупных генераторах для получения двойного газа применяют автоматические удаление золы, управление и загрузку топлива. В Германии в подобных установках первоначально стремились получить первичную смолу, позднее же перешли к работе с максимальным получением высококалорийного газа. В обоих случаях стремятся к достаточной перегонке топлива в швельшахте во избежание разложения продуктов перегонки, потери их в период горячего дутья и уменьшения зоны газификации.

Продолжительность отдельных периодов дутья зависит от условий работы и свойств топлива.

Данные о работе установок двойного газа и использовании тепла в них

Штрахе [129] приводит следующие данные о работе установки для получения двойного газа при 45-часовом испытании. При опыте была прогазифицирована смесь из 8569 *кг* верхнесилезского угля (содержание золы— 8,5%, влаги — 7,5%, летучих — 28%, высшая теплотворная способность — 6330 *кал/кг*, выход смолы — 9,1%) и 1362 *кг* кокса (влаги — 21%, золы — 9,1%, теплотворная способность — 5690 *кал/кг*). Получено было 130 *м*³ двойного газа на 100 *кг* смеси топлива (165 *м*³ на 100 *кг* органической массы). Состав газа был следующий: CO_2 — 7,8%, CO — 33,8%, CH_4 — 5%, C_mH_n — 0,8%, H_2 — 50,1%, N_2 — 2,3% и O_2 — 0,2%; высшая теплотворная способность — 3260 *кал/м*³, низшая — 3013 *кал/м*³; выход смолы составил 7,26% от веса угля.

Тепловой баланс генератора приведен в табл. 53.

Высокий к. п. д. генератора объясняется примесью значительного количества кокса, облегчающего процесс газификации благодаря разрыхлению слоя и улучшению передачи в слое тепла, связанному с большей теплопроводностью кокса.

Интенсивность газификации при получении двойного газа, отнесенная к площади сечения шахты генератора, составляет для каменного угля 220—160 *кг/м² час*.

При газификации в установке двойного газа бурого угля, высушенного по методу Флейснера, были получены следующие результаты [129].

Данные по углю: влажность — 12,9%, зольность — 9,3%; технический анализ: кокса — 38,4%, летучих — 39,4%, высшая теплотворная способность — 5220 *кал/м*³; швельанализ в трубке: выход

Таблица 53

Тепловой баланс генератора двойного водяного газа

Приход		Расход	
Наименование статей	%	Наименование статей	%
Теплосодержание топлива	0,10	Теплосодержание двойного газа	2,40
» пара	0,59	Теплосодержание неразложившегося пара	1,46
» воздуха	0,32	Теплосодержание смолы	0,08
Теплотворная способность топлива	98,99	Теплосодержание газов горячего дутья	6,37
		Теплосодержание шлаков	0,10
		Теплотворная способность двойного газа	66,40
		Теплотворная способность газов горячего дутья	7,06
		Теплотворная способность смолы	8,60
		Теплотворная способность углерода в уносе и шлаке	3,47
		Потеря в окружающую среду	4,06
Итого	100,00	Итого	100,00

газа — 0,17 *м³/кг*, тепло в газе — 756 *кал/кг*, выход смол — 9,1%, CO_2 в газе — 29%, объемный вес газа — 1,117 *кг/м³*; элементарный анализ: C — 52,01%, H — 4,15% и S — 0,48%.

Состав полученного газа был следующий: CO_2 — 8,4%, CO — 34,2%, CH_4 — 6,3%, C_mH_n — 0,2%, H_2S — 0,5%, H_2 — 38,4%, O_2 — 0,3% и N_2 — 11,7%; теплотворная способность — 3030 *кал/м³*. Содержание CO_2 в газах горячего дутья — 5,4%. Выход двойного газа — 76,4 *м³* на 100 *кг* угля. Содержание горючего в шлаке — 29,3%.

Тепловой баланс процесса приведен в табл. 54.

Использование тепла газов горячего дутья может повысить к. п. д. установки.

Значительная реакционная способность бурого угля способствует получению в газах горячего дутья значительного количества окиси углерода.

Данные о работе установки Пинча для получения двойного водяного газа, состоящей из генераторов диаметром в 3 *м* с вращающимися решетками, в которых процесс швелевания протекает в швельшахте, надстроенной над генератором и не имеющей внешнего обогрева, следующие [129]: топливо — буроугольные брикеты состава: влаги — 11,27%, золы — 9,8%, летучих — 31,03%, выход кокса — 57,7%, теплотворная способность — 5530 *кал/кг*; швельанализ по Фишеру: кокса — 51,72%, смолы — 12,2%, подсмольной воды —

Таблица 54

Тепловой баланс генератора двойного газа

Приход		Расход	
Наименование статей	%	Наименование статей	%
Теплотворная способность угля	98,5	Теплотворная способность двойного газа	44,1
Теплосодержание угля	0,1	Теплотворная способность смолы	14,1
» воздуха	0,1	Теплотворная способность шлаков	3,2
» пара	1,3	Теплотворная способность уноса	0,2
		Теплотворная способность газов горячего дутья	16,4
		Теплосодержание газов горячего дутья	8,2
		Теплосодержание двойного газа	0,3
		Тепло испарения влаги угля	1,4
		Тепло сухой перегонки угля [1]	6,5
		Потеря в окружающую среду (по разности)	5,6
Итого	100,0	Итого	100,0

16,8%, газа (15°, 750 *мм*) — 135,02 *л/кг*. Выход смолы — 7,2 *кг* на 100 *кг*.

Выход газа из 1 *т* брикетов составил 845 *м³* (0°, 760 *мм*), уд. вес — 0,665; состав газа: CO_2 — 13,0%, CO — 29,6%, CH_4 — 6,9%, H_2 — 40,9% и N_2 — 9,6%; $Q_в$ — 3050 *кал/м³*.

При опытах продолжительность отдельных периодов была та же, что и при нормальной работе на смеси угля и кокса, хотя температуры в слое были более низкие. К. п. д. газификации составлял 46,6%.

Опыт газификации на двойной водяной газ показал, что спекаемость топлива, наличие в нем пыли и свойство топлива распадаться при нагревании сильно ухудшают процесс. Кроме того большие затруднения доставляет образование в генераторе внутреннего малоактивного или мертвого ядра. Выше упоминалось, что с образованием неактивного ядра можно бороться применением шамотного сердечника (керна), выходящего или не выходящего за пределы зоны газификации. Было также предложено отводить газы из середины шахты, что способствует прохождению газов через середину слоя. Высказываются также соображения, что слой топлива, находящийся под нагрузкой топлива в швельшахте, уплотняется, и поэтому количество газов, проходящих через середину шахты, уменьшается сравни-

[1] Большая величина статьи вызывает сомнение.

тельно с обычным, и в качестве мероприятия, необходимого для улучшения работы генератора, предлагается совершенно отделить топливо в швельшахте и в шахте.

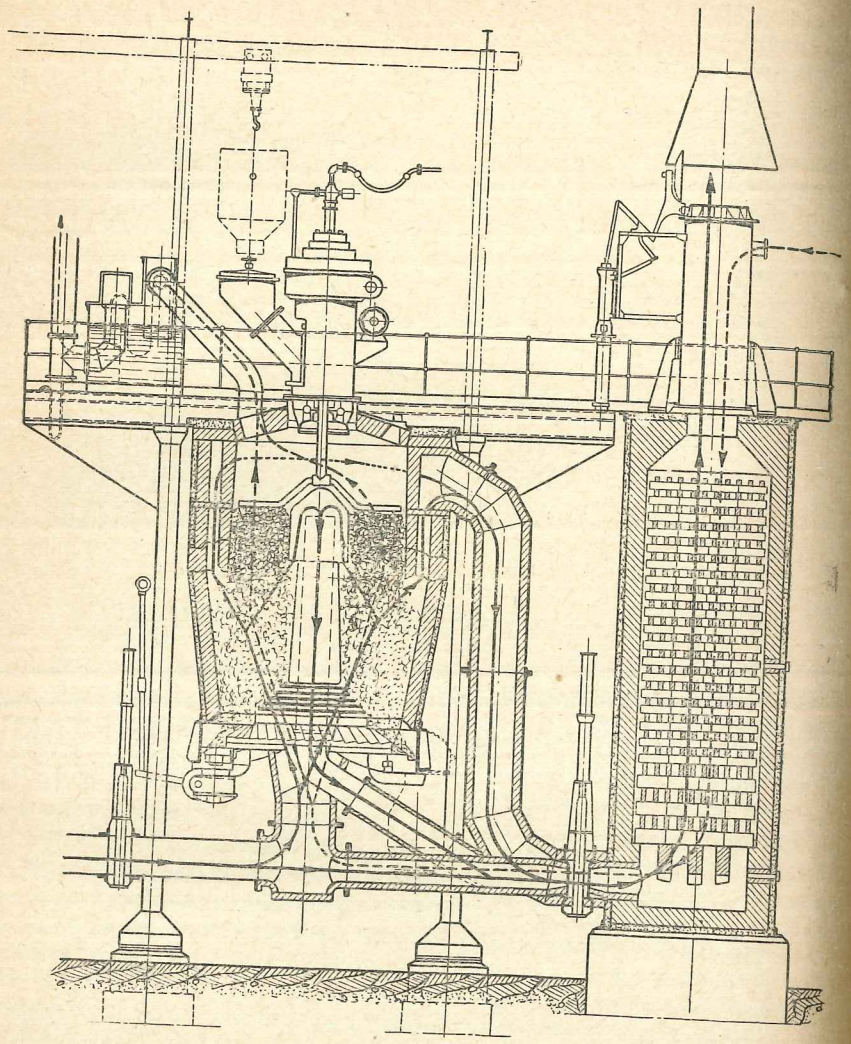


Рис. 104. Генератор двойного водяного газа с керном и мешалкой:
——— движение воздуха и продуктов воздушного дутья,
– – – движение водяного пара и водяного газа

В генераторе двойного водяного газа спекающиеся угли могут быть применены в смеси с бурыми или при условии использования автоматических приспособлений для разрыхления слоя. По некоторым данным, при шуровке в более глубоких слоях топлива в генераторах водяного газа наблюдается сильное распадение угля.

На газовом заводе в Дрездене [136] был переконструирован генератор двойного газа (рис. 104). Вместо высокой швельшахты была устроена широкая и низкая, в которой уголь разрыхлялся мешалкой Чапмана. Недостатком такой конструкции являлось образование инертного конуса топлива, не участвующего в газообразовании. Для устранения инертного конуса на решетке генератора был устроен полый керн, снабженный отверстиями для подачи воздуха или отвода продувочных газов. Подача воздуха внутрь позволила сжигать большее количество горючих продуктов воздушного дутья в самом генераторе и тем самым вести процесс более эффективно как в смысле экономичности, так и в отношении разогрева топлива. Благодаря такой реконструкции генератора удалось газифицировать значительно спекающийся уголь. Производительность генератора зависит от свойств и крупности угля. Однако по реконструкции даже при газификации смеси из 50% пылевидного угля с высокой спекаемостью и 50% мелочи длиннопламенного угля она не была ниже нормы. После трехмесячной работы на стенах генератора не было шлака. Керн был в исправности и отверстия сохранили свое сечение.

Получение карбюрированного двойного водяного газа

При получении двойного газа каменные угли дают газ с теплотворной способностью в 3200—3250 *кал/м*³ и буроугольные брикеты — 3000—3050 *кал/м*³. Увеличение теплотворной способности и количества газа возможно за счет разложения получающейся при газификации смолы (самокарбюрирование). Оно производится двумя путями: или с предварительным улавливанием смолы в газоочистительной установке и последующим превращением ее в газ в газогенераторе или в карбюраторе, или же путем непосредственного разложения смолы в газе при прохождении последнего через карбюратор. Карбюрированием в слое топлива избегают установки отдельного карбюратора и большой потери тепла в нагреве двойного газа по выходе из карбюратора, но контроль и установление необходимой для разложения смолы температуры в этом случае сложнее и требуется установка специального аппарата — смолоотделителя.

Из имеющихся способов для разложения смол в газогенераторе следует отметить введение смол сверху швельшахты и вспрыскивание смолы в слои более горячего кокса. Способ с подачей смолы сверху слоя основан на том, что смола при стекании по слою и нагревании многократно подвергается возгонке и разложению, пока не превратится в газы и кокс, подвергающийся газификации в более горячих слоях. Разложение смолистых веществ отчасти происходит в самих газогенераторах в случае достаточно высокой температуры в верхней части слоя, что имеет место при сухих топливах и невысоком слое. Однако полное разложение смол может быть достигнуто лишь путем введения их в более горячие слои кокса. При прохождении смолистых веществ через наиболее горячие слои кокса они разлагаются преимущественно на углерод и водород и не дают значительного повышения теплотворной способности газа.

Улавливание смолы из газа для подачи в генератор происходит с помощью обычных смолоуловителей, в которых можно при желании улавливать высококипящие фракции смолы путем поддерживания достаточно высокой температуры газов. Теплотворная способность газа может быть повышена путем самокарбюрации смолой в среднем на 250—350 *кал*.

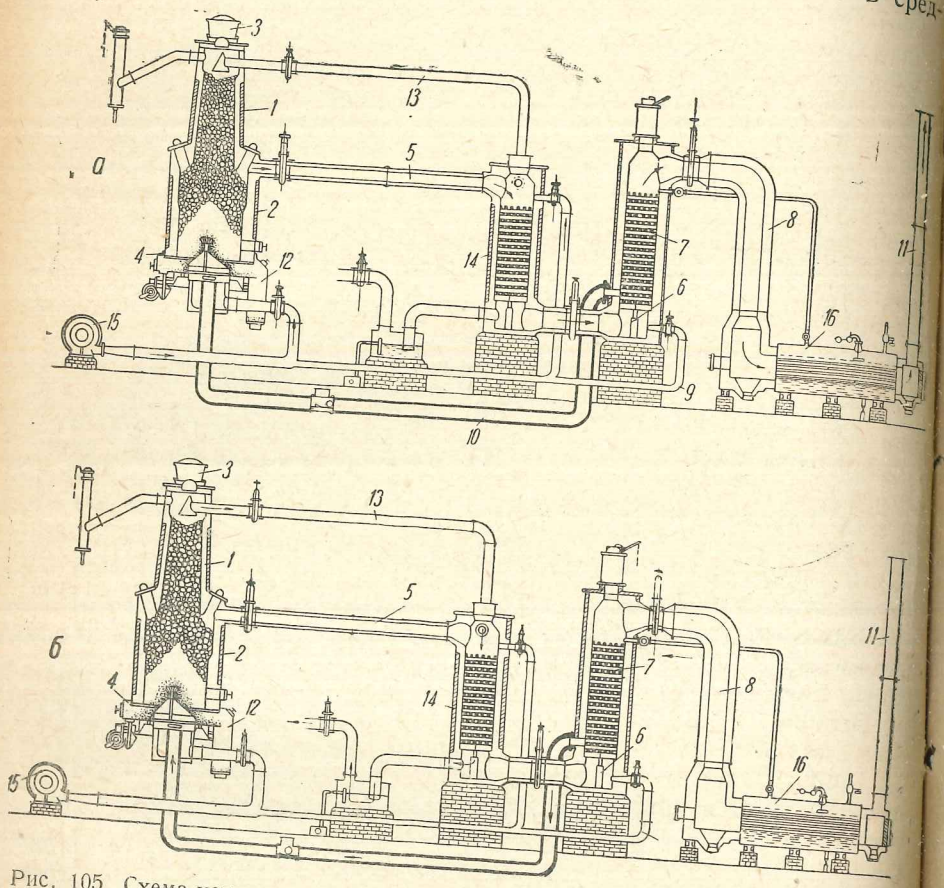


Рис. 105. Схема установки Пинча для получения карбюрированного двойного водяного газа:

1—швельшахта, *2*—основная шахта, *3*—загрузочное приспособление, *4*—сухой затвор генератора, *5*—газопровод продуктов горячего дутья, *6*—камера сгорания, *7*—пароперегреватель, *8*—газопровод к паровому котлу, *9*—воздухопровод к камере сгорания, *10*—паропровод к генератору, *11*—дымовая труба, *12*—зольный карман, *13* — газопровод двойного водяного газа, *14*—карбюратор, *15*—вентилятор, *16*—паровой котел

Дополнительное повышение теплотворной способности газа возможно за счет введения в карбюратор или в слой топлива нефтетоплива извне.

На рис. 105 показана схема установки Пинча для получения двойного водяного газа. На рис. 105, *а* показаны ход воздуха от вентилятора и движение газов воздушного дутья и продуктов горения.

Последними обогреваются карбюратор, пароперегреватель и котел-утилизатор.

На рис. 105, *б* показано движение пара и двойного водяного газа в период газования. Пар из котла-утилизатора перегревается в одной камере, в другой камере происходит карбюрирование двойного водяного газа.

Ниже приводятся данные о работе установки Крейза в Nanterre[129]. Установка снабжена камерой для разложения смол — фиксатором, испарителем с насадкой из углового железа и пароперегревателем с огнеупорной насадкой.

Обогрев фиксатора, пароперегревателя и испарителя производится продуктами горячего дутья.

Производительность установки — 1000 *м*³/*час* газа с теплотворной способностью в 3600 *кал*/*м*³. Давление воздуха под решеткой составляет 900 *мм*. Температура в фиксаторе составляет примерно 750°, а температура газов при выходе из перегревателя 350°. Содержание CO_2 в газах горячего дутья при входе в фиксатор — 12% и при выходе из испарителя — 18%; содержание CO соответственно падает с 15 до 5%. Пар перегревается до 400°. Двойной водяной газ, имеющий теплотворную способность в 3100—3200 *кал*/*м*³ и несущий с собой пары смол, поступает в фиксатор в нижней его части; в фиксаторе пары смол разлагаются на постоянные газы (преимущественно метан). Газ из фиксатора поступает через гидравлический затвор в коллектор. Продукты сухой перегонки, выделяющиеся в швельшахте в период горячего дутья, отводятся в вспомогательный приемник газа и подвергаются очистке от смол.

В описываемой установке все клапаны приводятся в движение автоматически; вентили, подверженные действию высокой температуры, снабжены водяным охлаждением.

В табл. 55 приведены данные двух испытаний установки на саарском угле [129].

Теплотворная способность газа была довольно постоянна. Предельные значения составили 3400—3750 *кал*/*м*³. Произведенные во время второго испытания исследования побочных продуктов дали следующие результаты: выход смол, не считая легких масел, — 4%, уд. вес смолы — 1,121, теплотворная способность смолы — 8980 *кал*/*кг*, содержание пыли в смоле — 4,43%, воды в смоле — 2%, отгон до 170° — 1,24%, 170—230° — 7,1%, 230—270° — 8,43% и 270—340° — 29,08%; пека — 49,4%. Масла состояли из углеводородов жирного ряда, быстро окислявшихся; ароматические углеводороды отсутствовали; содержание фенолов было значительно. Содержание аммиака, не улавливавшегося в установке, при выходе из перегревателя составляло 3 *кг* на 1 *т* угля. Данные указывают на значительный эффект карбюрации, а именно на повышение теплотворной способности на 450—500 *кал*/*м*³.

Тепловой баланс установки представлен в табл. 56.

Современные установки для получения двойного карбюрированного газа снабжаются генераторами с вращающимися решетками и котлами-утилизаторами.

Данные испытания установки двойного карбюрированного газа

Таблица 55

Данные	Количество	Данные	Количество
Топливо:		Выход (в $м^3$ на 1000 *кг*)	1229
влажность (в %)	2,30	Теплотворная способность газа (в *кал*/$м^3$)	3650
летучих (в %)	34 08	Бензола в газе (в *г*/$м^3$)	7,375
углерод остатка (в %)	56,35	Средний состав газа (в %):	
золы (в %)	7,27	CO_2	5,5
высшая теплотворная способность (в *кал*/*кг*)	7220	CO	29,8
Состав (в %):		C_mH_n	1,8
C	74,94	H_2	44,1
H	4,98	CH_4	11,0
O	8,18	N_2	7,8
N	1,37	Состав газа до и после карбюрации (единичные—не средние—пробы) (в %):	до / после
S	0,96	CO_2+H_2S	8,2 / 7,8
Продолжительность опыта (в часах)	51,5	C_mH_n	0,7 / 2,2
Продолжительность работы (в часах)	49⅝	CO	29,1 / 27,6
Расход угля (в *кг*)	47100	H_2	50,5 / 47,5
Количество золы (в *кг*)	3400	CH_4	7,1 / 10,7
Обратного кокса от веса угля (в %)	2,82	N_2	4,4 / 4,2
Получено газа (в $м^3$)	58090	Теплотворная способность (в *кал*/$м^3$)	3200 / 3710

Тепловой баланс установки двойного карбюрированного газа

Таблица 56

Приход		Расход	
Наименование статей	%	Наименование статей	%
Теплосодержание:		Теплосодержание:	
угля, воды, воздуха	0,4	двойного газа, влаги газа, паров смол, дымовых газов	13,4
Теплотворная способность угля	99,6	Теплотворная способность:	
		двойного газа	61,9
		смолы	5,0
		дымовых газов	5,3
		горючего в остатках	2,6
		Остаток (в окружающую среду и пр.)	11,8
Всего	100,0	Всего	100,0

Подвод дополнительного тепла в швельшахту

В работе генераторов двойного газа выявился недостаток, заключающийся в том, что сухая перегонка не успевает произойти в швельшахте, а это вызывает излишние потери горючих газов в период горячего дутья и уменьшает высоту реакционной зоны. Увеличение количества тепла, передаваемого топливу, достигается разными путями: введением в генератор излишнего сильно перегретого пара, возвратом в генератор сильно подогретой части получающегося двойного газа и переносом ею тепла кокса в швельшахту и подводом перегретого пара или сильно подогретой части двойного газа у основания швельшахты.

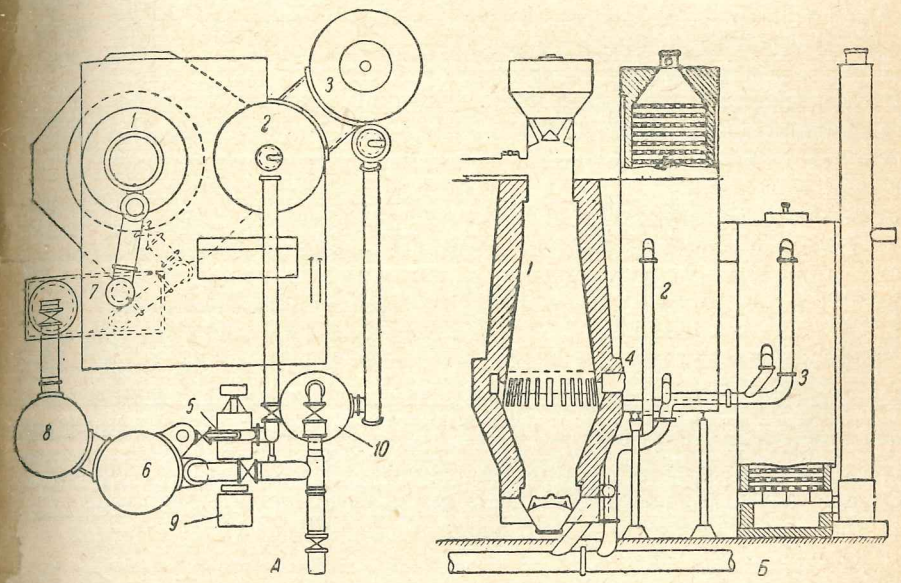


Рис. 106. Установка двойного карбюрированного газа с обогревом циркуляционным газом: *А*—план, *В*—разрез

Обогрев швельшахты потоком горячего газа использован в представленной на рис. 106 установке для получения двойного карбюрированного нефтетопливом водяного газа с высокой теплотворной способностью (4055 *кал*/$м^3$) [129].

Установка состоит из генератора *1*, снабженного высокой (4,3 *м*) швельшахтой, регенератора *2* и карбюратора *3*. У места соединения нижней шахты генератора и швельшахты находится кольцевой канал *4*, сообщающий генератор с регенератором *2* и соединяющийся с внутренностью генератора многочисленными щелевидными отверстиями.

Газы горячего дутья через канал *4* попадают в регенератор, дожигаются в нем и отводятся частично через карбюратор *3* (сжигание возможно и в последнем) в дымовую трубу. В период газования пар

пускается под решетку, а циркуляционный газ подается вентилятором *5* из скруббера *6* в регенератор *2*, в котором он, проходя сверху вниз, нагревается. Из регенератора циркуляционный газ попадает в канал *4*. Водяной газ и нагретый циркуляционный газ смешиваются и проходят швельшахту. Полученный газ через гидравлический затвор *7*, трубчатый холодильник *8* и скруббер *6* отводится вентилятором *9*. При карбюрации часть газа проходит карбюратор *3* и скруббер *10*.

Для циркуляции применяется только некарбюрированный газ.

Продолжительность горячего дутья — 2 мин., газования — 6 мин. После газования снизу в верхнюю часть карбюратора или генератора в течение нескольких секунд пускается пар, вытесняющий остающиеся там газы. В каждый третий период ведется обратное газование: водяной пар поступает в карбюратор *3* и через регенератор *2* и канал *4* поступает в генератор, проходя слой кокса сверху вниз. В этот период не происходит ни циркуляции, ни карбюрации. Обратным газованием достигаются выравнивание температур в шахте и лучшее использование регенератора. Продукты сухой перегонки, выделяющиеся в швельшахте в период горячего дутья, отводятся по специальному трубопроводу в газоочистительную установку.

Работа установки хорошо контролируется с помощью соответствующей аппаратуры. Подача нефтетоплива в карбюратор регулируется автоматически. Изменение количества циркулирующего газа производится с помощью регулирования числа оборотов вентилятора.

При пуске установки выявилось, что значительное содержание в угле мелочи и пыли вызывало зависание топлива и сильный унос, что было устранено путем отсева мелочи из топлива. Выявилось также, что в регенераторе образуется нагар, который требовалось прожигать два раза в день по полчаса. Лучшее охлаждение и очистка от смол циркуляционного газа дали возможность сократить продолжительность прожигания до 10 мин. в сутки.

О работе установки имеются следующие данные. Среднее число периодов в сутки — 138, длительность газования в сутки — 18 час. 24 мин., расход угля в сутки — 8,95 *т*, выход газа — 1350 *м³/т*, высшая теплотворная способность некарбюрированного газа — 3200 *кал/м³*, карбюрированного — 3910 *кал/м³*, расход нефтетоплива — 159 *л/т*; состав дестилляционного газа, выделяющегося из швельшахты в период горячего дутья: CO_2 — 6,4%, C H_n — 1%, CO — 14,1%, CH_4 — 18%, H_2 — 39,1%, N_2 — 20,9%, теплотворная способность — 3400 *кал/м³*; состав некарбюрированного двойного газа: CO_2 — 4,6%, C_mH_n — 0,6%, CO — 32,6%, CH_4 — 7,9%, H_2 — 47,8%, N_2 — 6,5%, теплотворная способность — 3270 *кал/м³*; состав карбюрированного газа: CO_2 — 3,1%, C_mH_n — 5,1%; CO — 32,1%, CH_4 — 14,4%, H_2 — 39,7%, N_2 — 5,6%, теплотворная способность — 4580 *кал/м³*.

Влажность угля составляла 2%, зольность — 2—16%. К. п. д. установки достаточно высок, но производительность ее оказалась малой. Уменьшение диаметра швельшахты (первоначально вверху — 1,07 *м* и внизу — 1,83 *м*) благоприятно повлияло на процесс. Циркуляция газа оказалась экономичной. Тепло отходящих газов может быть дополнительно использовано в котле-утилизаторе.

В других установках циркулирующая часть газа попадает в теплообменник непосредственно из генератора и, подогревшись до 700°, поступает в швельшахту.

В настоящее время для циркуляции применяется преимущественно очищенный газ, что связано с сильным износом вентиляторов при горячем смолистом газе, неудобством паровых инжекторов, сильным засорением насадки регенератора и невозможностью поддержания режима, благоприятного для разложения смол и масел.

На рис. 107 представлена установка Бамага. В ней газы горячего дутья выходят из шахты *1* генератора и проходят через два теплообменника *2* и *3*, в которых дожигаются и отдают значительную часть своего тепла. Далее они попадают в котел *4*, который соединен с охлаждающим кожухом генератора.

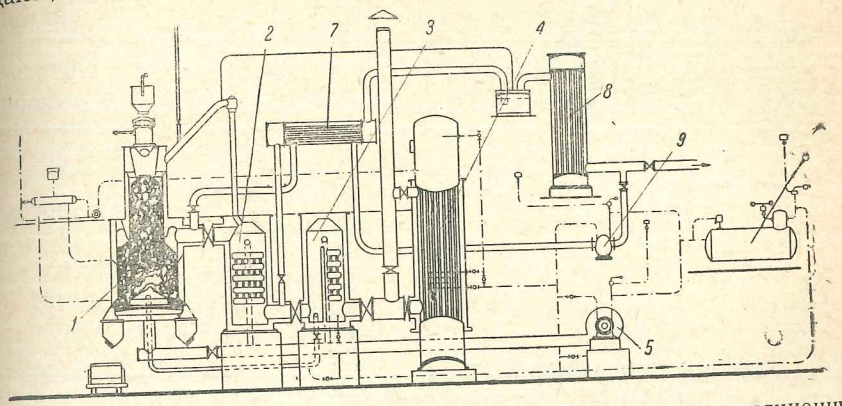


Рис. 107. Установка двойного водяного газа с обогревом циркуляционным газом

Получаемый в котле пар приводит в движение воздуходувку *5*. Отработанный мятый пар поступает в аккумулятор пара *6*.

При газовании пар из аккумулятора направляется во второй теплообменник *3*, перегревается и поступает в генератор. Получающийся газ проходит швельшахту и поступает в теплообменник-карбюратор *2*, где происходит разложение смоляных паров. В газопровод газ попадает, пройдя предварительно теплообменник *7*, в котором подогревается циркуляционный газ, гидравлический затвор и холодильник *8*. Вентилятором *9* засасывается из газопровода часть газа, которая через теплообменник *7* прогоняется в кольцевое пространство у основания швельшахты.

Этим устройством достигается также использование тепла газа, выходящего из карбюратора с высокой температурой.

Особые конструкции установок двойного водяного газа

Иногда в газогенераторах двойного водяного газа горячее дутье производится в поперечном направлении для получения высокого раскаленного слоя кокса. При этом имеет место плохое выгорание горючего в остатках.

Иногда применяют установки, состоящие из двух соединенных генераторов. В подобных установках Гумфрея и Глазгофа горячее дутье ведется одновременно через оба генератора снизу вверх; газование же ведется последовательно, причем в одном генераторе через слой кокса сверху вниз и в другом — через слой кокса и швельшахту снизу вверх; таким образом в образовании водяного газа участвует слой кокса обоих генераторов, что позволяет работать в отдельных генераторах с низким слоем топлива и с большим количеством углекислоты в период горячего дутья. При большом расходе газа шахты могут работать отдельно.

На рис. 108 представлена подобная установка (система Tully). В период горячего дутья воздух подается в генераторы *1* и *2*, и продукты горячего дутья дожигаются в регенераторах *3*, в которые через трубопроводы *4* подается воздух. Продукты горения отводятся через трубопроводы *5*. В период парового дутья в один из регенераторов через штуцер *6* подается пар; он перегревается, проходит через отверстия *7* в слой кокса в шахте *1* сверху вниз, поступает через канал *8* в генератор *2*, где проходит сначала слой кокса, а потом швельшахту.

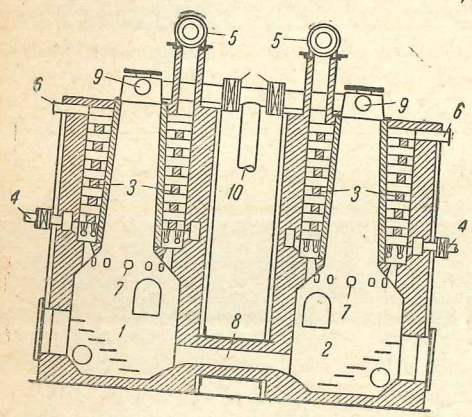


Рис. 108. Сдвоенный генератор Тиле

Полученный газ отводится через отверстия *9* в газопровод *10*.

Эти установки применяются на ряде маленьких заводов в Англии.

Использование тепла в установках двойного водяного газа

К. п. д. газификации при получении двойного газа составляет в среднем при отсутствии карбюрации 60% и при наличии таковой — 66%. Теплосодержание двойного газа при работе с разложением смол в крекерах составляет значительную величину — 5—6%, так как газ выходит из крекера с высокой температурой (приблизительно 700°). При работе без крекирования смол потеря не велика в силу низкой температуры газа. Количество неразложенного пара в случае двойного газа меньше, чем в случае водяного, что объясняется большей реакционной способностью полукокса и меньшими скоростями пара при получении двойного газа.

Способы повышения теплотворной способности двойного водяного газа

Путем газификации битуминозных топлив на двойной водяной газ с разложением смолы получают газ с примерной теплотворной способностью в 3600 *кал/м*³. В случае необходимости повышения теплотворной способности газа таковое может быть произведено

проще всего путем дополнительного карбюрирования газа смолой или нефтетопливом. Высокая цена и дефицитность смолы и нефтетоплива вынуждают часто применять другие способы для обогащения газа, к числу которых можно отнести следующие: отъем из зоны газификации части кокса, что повышает относительное содержание в двойном водяном газе продуктов сухой перегонки; добавка к газу высококалорийных газов, полученных при коксовании и швелевании твердого топлива или обработке жидкого топлива (нефтегаз); отдельный отвод части получающегося при газификации водяного газа или швельгаза.

При отъеме кокса получается меньше водяного газа и ухудшаются условия для перегонки топлива в швельшахте.

Отъем кокса производится из верхней части нижней шахты, где он не слишком обогащен золой, и следовательно может быть использован для других нужд.

В некоторых случаях при отборе кокса его охлаждают путем впуска в нижнюю часть шахты пара или холодного газа, благодаря чему значительная часть тепла, уносимого коксом, возвращается в газогенератор.

Фирма «Дельвик-Флейшер» развила идею Штрахе об устройстве в генераторе реторты, обогреваемой продуктами горения газов воздушного дутья, и создала конструкцию, в которой топливо непрерывно подогревается в ретортах за счет горения газов воздушного дутья и части водяного газа.

За счет преимущественного внешнего нагрева в реторте достигаются температуры выше 800°. Сжигание газов производится в специальной топке, куда газы поступают из генератора через пылеуловитель. Подача водяного газа осуществляется с помощью воздушного инжектора. Продукты горения, пройдя топочные каналы, направляются в котел.

Установка снабжена отверстием для отъема кокса и подводом смолы для карбюрирования, расположенным несколько выше наиболее горячей зоны реторты.

В подобной установке при газификации каменного угля получается 0,95 *м*³/*кг* газа с теплотворной способностью в 3800 *кал/м*³. Карбюрация газа смолой газа повышает теплотворную способность до 4000 *кал/м*³. Дальнейшее повышение теплотворной способности может быть достигнуто отъемом кокса.

Недостаток способа — уменьшение выхода газа вследствие того, что часть его идет на обогрев реторты; преимущество — легкое обслуживание и быстрый пуск в ход, что имеет значение для малых установок.

Непрерывное получение двойного водяного газа

Периодическое получение двойного водяного газа имеет все те же неудобства, что и перечисленные в отношении водяного газа. Одинаковы и пути, с помощью которых переходят к осуществлению непрерывного процесса: высокий подогрев пара, подвод дополнительного тепла путем нагревания камеры газификации снаружи или изнутри, подведение высоко нагретой циркулирующей части газа,

частичная газификация за счет кислорода, добавляемого к водяному пару, и т. д.

12. ГАЗОГЕНЕРАТОРЫ ДЛЯ ГАЗИФИКАЦИИ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ

Газификация под высоким давлением в целях получения газа с высоким содержанием CH_4 начала применяться в опытном порядке лишь в последние годы.

На рис. 109 показан генератор фирмы «Лурги» полупромышленного типа. Площадь сечения генератора — 1 $м^2$ и высота около 3 $м$. Он снабжен вращающейся решеткой и охлаждающим кожухом, в котором получается пар. Загрузка топлива и удаление золы производятся через специальные затворы. Применение охлаждающего кожуха предупреждает разъедание кожуха кислородом и обезуглероживание образующимся водородом [112, 137].

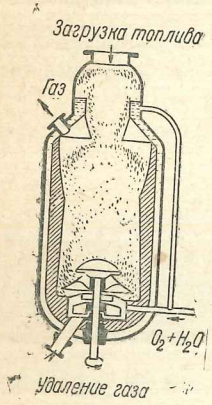


Рис. 109. Генератор Лурги

Генератор снабжается кислородом от установки Линде. Парокислородная смесь подогревается перед поступлением в генератор до 450—500°. Газ из генератора проходит пылеуловитель, охлаждается, очищается от смолы, после чего из него удаляют промывкой CO_2 и H_2.

В табл. 34 приведены результаты опытов в генераторе Лурги при различных топливах. Интенсивность газификации составляла при этом до 600 $кг/м^2$ $час$.

При дальнейших опытах интенсивность газификации при мелкозернистом топливе (3—8 $мм$) доводили до 900 $кг/м^2$ $час$. При этом шлакования не наблюдалось и шуровки не требовалось. Заметного пылеобразования не было, что связано с малыми скоростями газа вследствие применения высокого давления (10—20 $ат$). Сопротивление слоя топлива при высоте его в 3 $м$ было меньше 60 $мм$ вод. ст.

Результаты дальнейших исследований представлены в табл. 35.

13. ГАЗОГЕНЕРАТОРЫ С ВЫПУСКОМ ЖИДКОГО ШЛАКА

Принцип работы

В генераторах с выпуском жидкого шлака в нижней части генератора поддерживаются столь высокие температуры, что шлак находится в расплавленном состоянии и в этом виде может быть спущен.

Получение шлака в жидком виде упрощает уборку золы, допускает применение топлив с легкоплавкой золой, дает возможность использовать металл и шлак, получаемые в качестве отхода, позволяет значительно увеличивать производительность генератора и имеет ряд других преимуществ.

До последнего времени эти генераторы, работающие с большой интенсивностью, не получили широкого применения вследствие легкости застывания шлака, большого уноса пыли и сильного разъедания футеровки.

Целый ряд возникших в последние годы проблем, в частности получения газа с высокой теплотворной способностью, с ничтожным содержанием водорода и на дутье, богатом кислородом, создания конструкций большой производительности, а также использования топлив с легкоплавкой золой и содержащих серу вновь вызвали интерес к этим генераторам.

Для увеличения текучести и понижения температуры плавления золы в генераторах с выпуском жидкого шлака к топливу примешиваются флюсы.

Имеется сходство между подобными генераторами и домнами, обусловленное общностью процессов, протекающих в зоне горна в доменной печи и в соответствующей зоне генератора, работающего с жидким шлакоудалением. При этих процессах соединения железа, содержащегося в золе топлива и в добавках к топливу, восстанавливаются до металла углеродом топлива. Кремний, марганец и фосфор также восстанавливаются из соответствующих кислородных соединений и образуют сплав с железом.

В качестве флюсов в генераторах с выпуском жидких шлаков применяются доменные шлаки, известняк и могут быть применены бедные, не пригодные для доменных печей железные руды.

Эти генераторы могут быть также использованы для переработки отходов от металлургических процессов и бедных руд (свинцовых, медных, оловянных и т. д.).

Состав шлака и свойства золы

Для бесперебойной и хорошей работы генератора с выпуском жидкого шлака требуется, чтобы получаемый шлак был достаточно подвижным и легкоплавким. Слишком густой шлак засоряет зону газификации, а слишком жидкий сильно разъедает футеровку генератора. Текучесть шлака зависит от величины отношения:

$$\frac{CaO}{Al_2O_3 + SiO_2}.$$

При малой величине соотношения шлаки тягучи в жидком состоянии и стекловидны и хрупки в холодном (кислый шлак); при большой величине отношения шлаки в горячем состоянии не тягучи, а в холодном рассыпаются (основной шлак). Согласно работам Фельда и Ройстера [138], особенно большое влияние на вязкость шлака оказывает глинозем, причем этими исследователями установлено, что при увеличении содержания глинозема до 20—30% шлаки могут быть достаточно жидкими и практически применимыми, хотя, согласно установившемуся мнению, содержание глинозема в шлаке не должно превышать 14,5%, так как при этом шлак получается очень густым.

Как показывают работы Мак-Кефери [139] в наиболее кислых шлаках (51% SiO_2) вязкость растет пропорционально содержанию глинозема. Шлаки с 50 и 45% SiO_2 обнаруживают максимум вязкости

соответственно при 20 и 25% Al_2O_3. При шлаках с 40 и 35% SiO_2 максимум вязкости передвигается к 27 и 29% Al_2O_3, при минимуме вязкости при 7 и 8—12% Al_2O_3. Более основные шлаки с 30 и 25% SiO_2 имеют наименьшую вязкость при 14 и 22% Al_2O_3. Для шлаков, содержащих SiO_2 в пределах 25—40%, наилучшая текучесть достигается при 1500°, когда сумма SiO_2 и Al_2O_3 равна 47%.

Прибавление к шлакам магнезии уменьшает вязкость. Добавление MgO до 5% увеличивает при той же вязкости пределы содержания извести. При содержании MgO в 20% все шлаки в пределах содержания CaO в 22—58% делаются жидкими. Практически уже 10% MgO гарантирует получение текучих шлаков, особенно если содержание глинозема в них велико.

Легкоплавкость шлака характеризуется количеством тепла, расходуемого на расплавление 1 *кг* шлака. На расплавление 1 *кг* легкоплавкого шлака затрачивается около 350 *кал*, и шлак имеет температуру плавления в 1200°.

Температура расплавления шлака зависит от его химического состава. В легкоплавких шлаках соотношение кремнезема и суммы окисей кальция и магния лежит в пределах 0,8—0,9. Относительное увеличение содержания в шлаке кремнезема или извести увеличивает температуру его плавления.

Гау Бабю составлена трехосная диаграмма, связывающая плавкость шлаков с содержанием в них SiO_2, Al_2O_3 и CaO. Пользуясь этой диаграммой, можно подобрать флюсы таким образом, чтобы получился легкоплавкий шлак. Можно также пользоваться диаграммами Мак-Кефери. С увеличением количества компонентов, входящих в состав шлака, понижается температура его плавления. Особенно выгодно в этом отношении введение MgO с заменой им CaO в шлаке.

Процессы в горне

Тепло в горне генератора с выпуском жидких шлаков затрачивается на плавление шлака, плавление чугуна, восстановление окислов железа, кремния и фосфора, разложение известняка, разложение водяного пара, а также на потерю в окружающую среду.

Рамбуш и Риксон (140) излагают ряд соображений о ходе процесса в генераторах с выпуском жидкого шлака.

Шлаки с высоким содержанием кремнезема плавятся медленно, в большом температурном интервале, от состояния размягчения до жидкоплавкого; известковистые же шлаки плавятся быстро, в малом температурном интервале.

При высокой температуре кремнекислота восстанавливается углеродом, причем получающийся кремний соединяется с железом. С уменьшением восстановления кремнекислоты шлак получается более кремнеземистым, а с увеличением — более известковистым. По этой причине в шихте, содержащей необходимое количество флюса, химический состав шлака в значительной мере зависит от температуры наиболее горячей зоны у фурм.

Чем ниже температура жидкоплавкого состояния шлака, тем большая часть тепла, выделяющегося в горне или вносимого в горн,

потребляется самим горном и тем меньшее количество остаточного тепла уносится в шахту.

В условиях постоянной температуры дутья режим горна можно характеризовать следующим образом.

При содержании в шихте необходимого количества флюса и наличии достаточного количества окислов железа тепло в горне хорошо используется с образованием легкоплавкого шлака. Потребление тепла на плавление шлака при низкой температуре жидкоплавкого состояния достигает максимума, и генератор работает удовлетворительно.

На рис. 110 показан расход тепла на расплавление шлака, отнесенный к 1 *кг* нелетучего углерода в шихте, для различных температур плавления шлака и температур дутья. В расходе тепла не учтены затрата на разложение водяного пара и скрытая теплота плавления шлака. Таким образом расход тепла определяется восстановлением окислов, плавлением чугуна и потерями в окружающую среду.

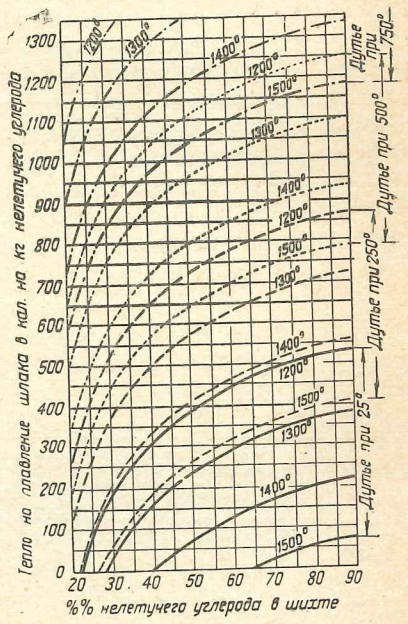


Рис. 110. Расход тепла на расплавление шлака

Если количество окислов для восстановления недостаточно и выплавлено мало железа, температура горячей зоны повышается, восстанавливается большее количество кремнекислоты, получается известковистый шлак с высокой температурой жидкоплавкого состояния, потребление тепла понизится, газогенератор будет работать на горячем ходу и произойдет сплавление шихты, загружаемой в генератор, выше слоя шлака, вызывающее затруднение в ходе процесса. Если количество окислов для восстановления и количество выплавленного железа больше, чем нужно, температура горячей зоны понизится, восстановление кремнекислоты задержится, получится кремнеземистый шлак с повышенной температурой жидкоплавкого состояния и тепла нехватит для плавки; в результате наступят застывание шлака и остановка генератора.

Вышеизложенное относится к условиям газификации при постоянной температуре дутья. Если температура дутья регулируется таким образом, чтобы вносить количество тепла, необходимое для образования легкоплавкого шлака, газогенератор может работать бесперебойно при различном составе шихты и максимальном расходе тепла на плавку.

Большое значение для благоприятного протекания процесса газификации в генераторах с выпуском жидкого шлака имеют сохра-

нение коксовым остатком топлива кусковатого прочного строения и окончание сухой перегонки топлива к моменту образования жидкого шлака. В противном случае истертое, мелкое топливо смешивается со шлаком, делается недоступным для воздействия кислорода и понижает подвижность расплавленного шлака (замусоривание горна), в результате чего нарушается нормальный ход генератора.

Применение подогретого дутья

При наличии возможности изменять количество вводимого в генератор тепла путем регулирования температуры дутья генератор может бесперебойно работать при различном составе шихты и расходе тепла в горне. При низком и высоком содержании в шихте железа процесс необходимо вести на сильно подогретом дутье; при высоком содержании в шихте углерода (70—80%) и нормальном ходе генератора в горне выделяется больше тепла, чем может быть использовано. Это подтверждается практикой работы на генераторах с выпуском жидкого шлака при применении одного кокса без добавки железной руды и скрапа.

Применение сильно подогретого дутья и регулирование температуры его обеспечивают максимальные выходы чугуна без ущерба для процесса газификации низкосортных топлив.

Использование металла и шлака

Шлаки и чугуны, получающиеся в генераторах с выпуском жидких шлаков, могут быть использованы. Состав получаемых шлаков зависит от состава золы топлива. Последний характеризуется высоким содержанием SiO_2 и Al_2O_3, низким — CaO и переменным — Fe_2O_3. Если содержание золы невелико, то химический состав шлака можно менять по желанию, например таким образом, чтобы получить непосредственно или путем последующей прибавки извести цемент требуемого состава. Если содержание золы в топливе велико, то флюс подбирают таким образом, чтобы получить легкоплавкий шлак.

Для использования пригодны не только основные шлаки; кислые шлаки также могут быть использованы, например в гранулированном виде — для изоляции, изготовления теплых бетонных кирпичей и в виде брусков — для мощения мостовых.

При применении генераторов с выпуском жидких шлаков [140] для переработки вместе с горючим отходов производств цветных металлов (возможно и бедных руд) цинк, свинец и олово возгоняются, а медь в соединении с серой образует королек. Возгоняющиеся и уносимые генераторным газом металлы могут быть выделены при очистке газа.

Генератор Эбельмана

Система генераторов с расплавлением шлаков является одной из самых старых [120]. Первые подобные конструкции были осуществлены в 30—40-х годах прошлого столетия Эбельманом.

В первоначальной конструкции Эбельмана генераторы не имели ни верхнего, ни нижнего затвора; шахта суживалась и кверху и книзу; топливо — отбросы древесного угля — подавалось с помощью юбки-

цилиндра, спущенного в загрузочное отверстие и заполненного топливом.

В качестве флюса прибавлялся доменный шлак или известняк. Эбельман применял и сухое и влажное дутье. При этом выявилось, что добавка пара вызывала застывание шлака на некотором расстоянии по вертикали от места ввода паровоздушной струи.

Анализ газа при применении сухого дутья был следующий: CO_2 — 0,5%, CO — 33,3%, H_2 — 2,8%, CH_4 — 0% и N_2 — 63,4%. Содержание CO близко к теоретическому. Эта конструкция давала сильное пыление, и в дальнейшем генераторам придавали форму, расширяющуюся кверху.

Генератор S. F. H.

Французское общество «Фише и Хертей» построило в 1907 г. генератор с выпуском жидких шлаков (S. F. H.). Он снабжен колоколом, препятствующим уносу пыли из свежезагруженного топлива и сепарации топлива, а также поддерживающим равномерный слой топлива в генераторе, и сужается в области горна.

Этот генератор имел значительную производительность даже при пользовании малоценным топливом, например бурым углем с зольностью в 40%. На 1 $м^2$ сечения, считая по уровню сопел, газифицировалось 800—1000 *кг* угля в час. Газ имел состав: CO_2 — 2,55%, CO — 29,47%, H_2 — 6,66% и CH_4 — 3,22%. Генератор не получил распространения вследствие необходимости постоянного наблюдения высококвалифицированного персонала и затруднительности шихтовки (подбора флюсов). Опыт показал, что выше сопел легко образуются своды, препятствующие опусканию топлива в область сопел и повышающие горячую зону. Капающий сверху шлак, попадая в область подачи холодного дутья, застывал и забивал генератор [119, 120].

Генератор Вюрта

В 1913 г. был испытан генератор Вюрта [120, 141] (рис. 111). Этот генератор имел горн диаметром в 1,6 *м* и высотой в 1,8 *м*, был снабжен заплечиками и цилиндрической шахтой; у пода имелось два отверстия для выпуска шлака и чугуна; на высоте 1,5 *м* от отверстий находилось 8 бронзовых фурм, охлаждаемых водой; вся высота генератора составляла 5,5 *м*; газ отводился двумя диаметрально противоположными трубопроводами. Дутье подавалось вентилятором Рута, имевшим производительность в 200 $м^3/мин$ и дававшим давление в 1200 *мм* вод. ст. Топливом являлся рурский кокс с кусками размером в 10—60 *мм* и с содержанием 12—15% золы. Состав золы был следующий: SiO_2 — 48%, Al_2O_3 — 36%, Fe_2O_3 — 9% и CaO — 3%.

При пуске обнаружились затруднения. Генератор в первые часы после пуска давал большое количество газа хорошего качества, шлаки легко спускались; по прошествии 15 час. фурмы стали затягиваться шлаком, нижняя часть генератора стала заполняться тестообразной массой, постепенно заполнившей внутренность генератора. Давление дутья увеличилось, количество газа уменьшилось; шлак перестал вытекать. Генератор с трудом был очищен от образовавшейся массы.

Изменение состава шихты, диаметра фурм, давления дутья и тому подобные средства помочь не могли. Причина неудачи заключалась в преждевременном сплавлении флюсов и золы кокса в результате чрезмерного повышения температуры в верхней части генератора. Для отбора тепла был применен подвод пара паровыми соплами на высоте 50 *см* от фурм для дутья. Сначала в виде плавня применялся известняк, но куски его не успевали прореагировать с SiO_2 золы. Тогда стали применять гранулированный доменный шлак состава: SiO_2 —

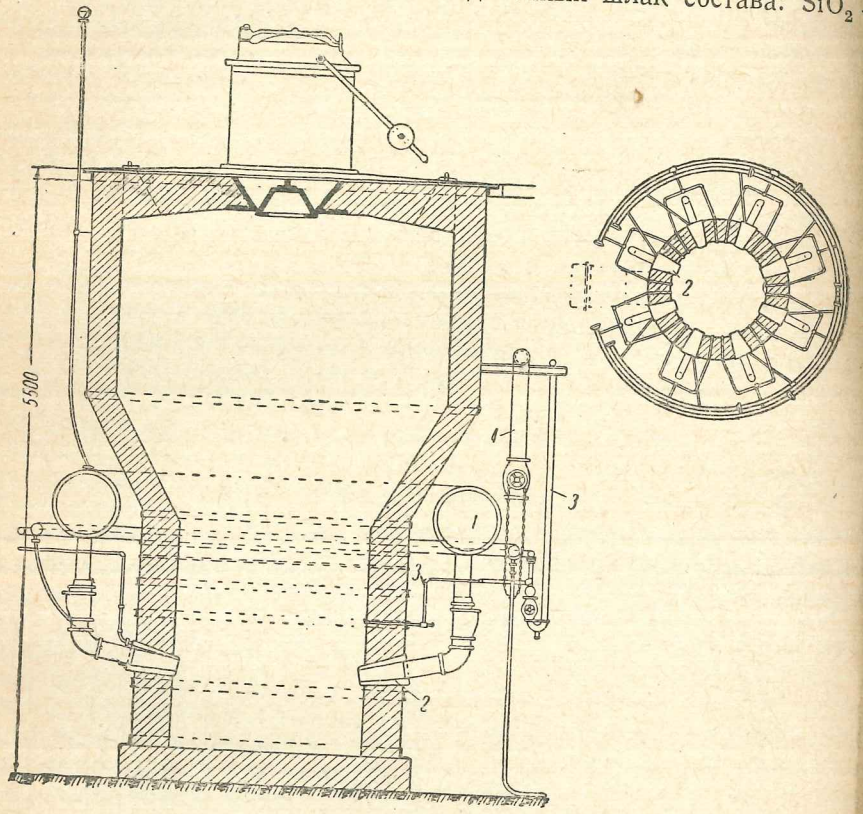


Рис. 111. Генератор Вюрта:
1—воздухопровод, *2*—охлаждаемые водой фурмы, *3*—паропровод, *4*—водопровод

30%, Al_2O_3 — 15%, CaO — 42%, MgO — 6%, Fe_2O_3 и MnO — 7%. Всего добавки составляли 10—12% от веса топлива. Воздух подавался подогретым до 240°. Получаемый шлак имел состав: SiO_2 — 38%, Al_2O_3 — 26%, CaO — 32%, MgO — 2%, Fe_2O_3 — 1% и MnO — 1%. Он выпускался с температурой 1500—1600°. Чугун получался кремнистый. Впоследствии доменный шлак заменили шлаком из того же генератора с добавкой сильно измельченного известняка для поддержания постоянства шихты.

При работе без подогрева дутья иногда бывали затруднения с выпуском шлака.

Температура газа в зависимости от влажности кокса составляла 550—800°. Топливо загружалось один раз в 15—20 мин., а шлак выпускался один раз в $1^1/_2$—2 часа. Шуровка не была нужна. Ремонт горна и заплечиков производился один раз в 6—8 месяцев.

Длительная работа генератора оказалась возможной без использования предусмотренной специальной камеры для подогрева пода генератора.

При применении коксика с содержанием: C — 87,4%, H — 0,5% и W — 4% состав газа был следующий: CO_2 — 2%, CO — 32%, H_2 — 7,5%, CH_4 — 0,5% и N_2 — 58%.

Содержание в газе сероводорода составило 1,52 *г/м³*, влаги — 27,8 *г/м³* и пыли — 21,7 *г/м³*.

Теплотворная способность: низшая — 1210 *кал/м³*, высшая — 1250 *кал/м³*. Из 1 *кг* кокса получалось 4,42 *м³* газа. Температура газа составляла 700°, давление воздуха — 600 *мм* вод. ст. и газа — 50 *мм*. Расход водяного пара был равен 0,23 *кг* и охлаждающей воды — 2,2 *кг* на 1 *кг* кокса. Тепловой баланс генератора приведен в табл. 57.

Таблица 57

Тепловой баланс генератора Вюрта

Приход		Расход	
Наименование статей	%	Наименование статей	%
Теплотворная способность топлива	94,0	Теплотворная способность газа	74,3
Теплосодержание пара	2,8	Теплосодержание газа	14,7
Теплосодержание воздуха	3,2	Теплотворная способность пыли	5,6
		Теплосодержание пыли	0,3
		Нагрев охлаждающей воды	1,0
		Теплосодержание шлака и чугуна	0,9
		Потери в окружающую среду	3,2
Итого	100,0	Итого	100,0

Производительность генератора составляла 50 *т/сутки*, что при диаметре в верхней части в 2,9 *м* дает интенсивность газификации в 300 *кг/м² час*. Шлак спускался попеременно из двух имевшихся отверстий каждые 2—3 часа; одновременно выпускалось небольшое количество чугуна. Количество уносимой пыли составляло 9,6% от веса топлива. Основная часть ее (6—7%) представляла собой грубую пыль, осаждавшуюся в пылеуловителе. Количество шлака составляло 13,3% и чугуна — 0,3%. Вода, охлаждавшая фурмы, подогревалась на 35°. Застывание шлака не имело места даже при снижении производительности наполовину.

Опыты Смита

К этому же периоду относятся опыты, проведенные Д. Смитом [119], с применением холодного и горячего дутья и подводом пара выше пояса дутьевых фурм. Топливом служил кокс с содержанием золы в 11%, а флюсом — известняк. Работа велась с малой интенсивностью; при этом наблюдались затруднения в достижении жидкоплавкого состояния шлака. При подогреве дутья до 227° условия работы облегчались, и добавка пара без ущерба для состояния шлака доходила до 0,75 *кг* на 1 *кг* кокса.

Генераторы завода Georgs-Marienhütte

С 1913/14 г. были начаты исследования процесса газификации в генераторах с выпуском жидких шлаков на заводе «Georgs-Marienhütte» (Германия) [140].

В табл. 58 приведены данные о размерах этих генераторов.

Таблица 58

Основные размеры и производительность генераторов с выпуском жидкого шлака завода «Georgs-Marienhütte»

Производительность в 1 сутки (в *т*)	Диаметр основания внутренний (в *мм*)	Диаметр шахты внутренний (в *мм*)	Полная высота (в *мм*)	Диаметр газоотводного отверстия (в *мм*)
10 — 15	1100	1500	4000	600
20 — 30	1600	2000	5000	800
30 — 45	1900	2300	5000	800
50 — 70	2350	2750	6000	1000
70 —100	2850	3250	6500	1200

Производительность генераторов доходит до 100 *т/сутки*. Пар не подается. Первичный воздух вдувается через охлаждаемые водой фурмы. Расплавленный чугун, получаемый из добавляемых флюсов, спускается через специальное отверстие у пода. На высоте 200 *мм* от отверстия для спуска чугуна находятся отверстия для спуска шлака.

Состав газа в среднем следующий: CO_2 — 0,6%, H_2 — 0,9%, CO — 33,4%, CH_4 — 0,5% и N_2 — 64,6%. Содержание сероводорода в газе — 0,39 *г/м³*, влаги — 7,9 *г/м³* и пыли — 5,3 *г/м³*. Теплотворная способность: низшая — 1085 *кал/м³*, высшая — 1095 *кал/м³*. Температура газа 800°. Давление воздуха — 400 *мм* и газа — 70 *мм*. Потребление охлаждающей воды — 7,7 *кг* на 1 *кг* кокса. Выход газа — 4,65 *м³/кг*.

Шлак выпускается приблизительно один раз в 4 часа, а чугун,

в зависимости от содержания железа в флюсах, — один раз в 8—12 час. Количество спущенного чугуна варьирует в пределах 0,5—1,25 *т* на 30 *т* газифицируемого топлива.

При том же составе кокса, что и в генераторе Вюрта, количество прибавляемого шлака составляет 17,7% от веса топлива. В соответствии с крупностью кокса и сравнительно небольшим давлением дутья количество уносимой с газом пыли не велико — 2,4%. Количество спускаемого шлака составляет 18%.

Тепловой баланс генератора приведен в табл. 59.

Таблица 59

Тепловой баланс генератора завода «Georgs-Marienhütte»

Приход		Расход	
Наименование статей	%	Наименование статей	%
Теплотворная способность топлива	99,1	Теплотворная способность газа	72,0
		Теплосодержание газа . . .	18,3
Теплосодержание воздуха . .	0,9	Теплотворная способность пыли	1,3
		Нагрев охлаждающей воды .	3,8
		Теплосодержание шлака . . .	1,5
		Потери в окружающую среду	3,1
Итого . . .	100,0	Итого . . .	100,0

Как видно из приведенных данных, в условиях применения кокса и отсутствия добавки пара к дутью температура газа высока и в нем мало влаги и водорода. Теплотворная способность газа зависит почти исключительно от содержания в нем CO. Опыт показывает целесообразность добавки в генератор веществ, содержащих железо. Слой чугуна, находящийся на поду генератора, предохраняет вышележащий шлак от соприкосновения с холодным подом, от местных охлаждений и застывания.

Генераторы, подобные установленным на заводе «Georgs-Marienhütte», были установлены на заводе «Gelsenkirchener Bergwerks» в Германии (Husten). На этом заводе работали на холодном дутье два генератора. В качестве флюсов применялись железная руда и скрап. Выход чугуна составлял до 200 *кг* на 1 *т* кокса. Опыты, поставленные на этом заводе с целью выяснения максимально допустимого для удовлетворительной работы генератора содержания золы в топливе, производившиеся путем добавления к коксу в различных количествах топочной золы, показали, что максимально допустимое количество золы при холодном дутье определяется выходом шлака в 90—95% от веса кокса, что соответствует содержанию в шихте 52—55% нелетучего углерода.

Опыты на заводах «Georgs-Marienhütte» и «Gelsenkirchener Be werks» дали возможность сделать следующие выводы. Наилучш размером кокса является $^1/_2$—2″; коксовая мелочь должна бы отгрохочена, как ухудшающая свойства получаемого шлака и спосо ствующая уносу пыли из генератора; содержание в топливе зо и ее состав должны соответствовать количеству шлака в 90—95% веса углерода топлива, что в большинстве случаев препятствует пр менению топлива с содержанием углерода менее 62%; сильно спека щиеся угли, а также угли, дающие непрочный кокс, не пригоди для газификации в генераторах с выпуском жидких шлаков; дл установления количества и состава флюсов необходимо постоянст количества и состава золы; прибавление железной руды и скрапа р комендуется увеличивать до возможного предела; расплавленны чугун способствует поддержанию шлака в жидкоплавком состоянии и представляет собой ценный побочный продукт.

Генераторы Пинча

Фирма «Пинч» вследствие застывания шлака и затруднений с его отводом заменяет основание генератора шлаковым сменным мешком (уплотненным асбестовым шнуром), расположенным на передвигающейся тележке. Каждые 6 час. мешок меняется. Во время смены мешка слой топлива поддерживается временной решеткой. Для большей производительности фирма применяет водяное охлаждение шахт.

Для предупреждения перерыва в производстве газа на время смены шлаковых тележек включается в действие эксгаустер, находящийся на магистрали холодного газа. Таким образом в период смены тележки генератор работает со всасыванием.

Генераторы, работающие на подогретом дутье

В 1920 г. в St. Etienne (140, 142) была пущена установка, работавшая на сланцах с применением дутья, подогретого в специальном трубчатом подогревателе до 400—600°. Шихта состояла главным образом из сланца с содержанием золы выше 70%. Генератор работал удовлетворительно и давал газ постоянного состава с теплотворной способностью в 1070—1250 *кал/м*³, кремнистый чугун и шлак, пригодный для изготовления цемента.

Французская фирма «Société Houillieres de St. Etienne» применяет с 1920 г. генераторы с выпуском жидких шлаков для газификации отходов от промывки угля. Дутье в генератор подается подогретое. Генератор имеет высоту в 5 *м* и площадь сечения в 0,5 *м*², книзу несколько уменьшающуюся. Дутье с давлением в 1500 *мм* вод. ст. подается через шесть охлаждаемых водой фурм. Чугун отводится у пода, шлаки — несколько выше. Воздухоподогреватель может отапливаться любым газом. Подогрев воздуха дает возможность применять многозольные топлива.

Состав газа меняется в зависимости от состава топлива. При применении топлива с содержанием золы в 31% и летучих в 26% состав газа был следующий: CO_2 — 2,6%, CO — 29%, H_2 — 11,7% и CH_4 — 4,4%; теплотворная способность — 1570 *кал/м*³. Газ из кокса

с содержанием золы в 22% имел состав: CO_2 — 0,6%, CO — 33% и H_2 — 1,5%; теплотворная способность — 1045 *кал/м*³.

В 1924 г. в St. Etienne была организована фирма «L'air chaud» для распространения генераторов с выпуском жидких шлаков, работающих на низкосортном топливе с подогретым дутьем и использованием чугуна и шлака.

В 1926 г. (140) в St. Etienne были смонтированы два генератора для газификации смеси сланца и низкосортного кокса производительностью по 120 *т* шихты в сутки. Диаметр генератора — 2,2 *м*, высота — 7,8 *м*; изнутри он футерован огнеупорным кирпичом, снаружи охлаждается брызгалками. В поду генератора имеются две летки, расположенные одна против другой и ведущие в приямок для разделения чугуна и шлака. Давление, создаваемое воздуходувкой, — 3000 *мм*. Подогрев дутья возможен до 600°. Выпуск шлака производится через полчаса; шлак поступает в яму и гранулируется водой, а расплавленный чугун собирается в жолобе, откуда спускается в форму с последующим охлаждением водой. Шлак направляется на дальнейшую переработку на цемент.

Последние эксплоатационные данные по работе установки характеризуются следующими данными.

Состав мытого сланца: влаги — 3%, золы[1] — 55%, летучих — 16% и нелетучего углерода — 29%. Состав золы сланца: SiO_2 — 36%, Al_2O_3 — 19%, CaO — 14%, MgO — 3% и FeO — 25%. Состав кокса: влаги — 10%, золы[1] — 24%, летучих — 1% и нелетучего углерода — 75%. Состав золы кокса: SiO_2 — 50%, Al_2O_3 — 28%, CaO — 6%, MgO — 1% и FeO — 12%; в известняке — 54% CaO. Состав газа: CO_2 — 3,5%, CO — 32,5%, H_2 — 4%, CH_4 — 1% и N_2 — 59%; низшая теплотворная способность — 1180 *кал/м*³. Состав чугуна: C — 2,7%, Si — 4,7%, S — 0,02—0,05% и P — 0,15%. Состав шлака: SiO_2 — 34%, Al_2O_3 — 22% и CaO + MgO — 43%;

$$\frac{SiO_2}{CaO + MgO} = 0{,}79.$$

Температура воздушного дутья 450°.

Суточный расход материалов на генератор: сланца — 40,4 *т*, кокса — 37 *т*, известняка — 22,6 *т* и скрапа — 5 *т*. Валовой выход газа — 220 000 *м*³, чистый (за вычетом расхода на воздухоподогреватель и сушилку для шлака) — 185 000 *м*³; выход шлака — 35 *т* (перерабатывается в 50 *т* цемента); выход кремнистого чугуна — 11 *т*.

Описанные генераторы работали попеременно в непрерывной эксплоатации в течение 6 лет.

В генераторе «L'air chaud» с успехом газифицировали также железистые сланцы с получением в виде побочных продуктов шлака и кремнистого чугуна, а также низкосортные каменные и бурые угли. Содержание нелетучего углерода в шихте подбиралось в пределах 30—45%, и температура воздушного дутья составляла 400—600°.

При использовании в шихте железной руды или железистых отходов целесообразно изготовление из них в смеси с топливом брикетов,

---

[1] На сухое вещество.

так как в этом случае легче протекает восстановление железа непосредственно углеродом.

Содержание кремния в чугуне вследствие высокой температуры в горне достигает 9%. Путем добавления в шихту железного скрапа содержание кремния можно понизить до 4—7%. Получающийся чугун содержит мало серы. Содержание фосфора в чугуне зависит от содержания его в золе. Содержание алюминия в шлаке выше, чем в доменном шлаке; железо практически отсутствует.

Количество шлака и ход процесса зависят от количества флюса, содержания нелетучего углерода и температуры дутья. Возможность регулирования температуры дутья облегчает ведение процесса.

Построенный во Франции генератор производительностью в 50 *т* при применении низкосортного угля с содержанием 30% золы и 30% летучих работал с добавкой железистых брикетов, изготовлявшихся из колчеданных огарков в смеси с угольной мелочью. Состав шихты был следующий: низкосортного угля — 36,5%, кокса — 10,4% железистых брикетов — 14,8%, известняка — 25,2% и скрапа — 13,1%. Газ имел теплотворную способность в 1300 *кал/м*³. Он очищался с помощью смолоуловителя Тейсена и сжигался под котлами; в качестве побочных продуктов получались кремнистый чугун и шлак, пригодный для изготовления цемента.

Генератор Ремана

Большой интерес представляет газификация в генераторах с выпуском жидких шлаков малоценных топлив. При этом основным затруднением повидимому явится унос пыли, тем более что в случае применения мелкого и легко распадающегося топлива требуется увеличение давления дутья.

Фирмой «Реман» предложена для этой цели конструкция генератора, в которой газ по выходе из генератора попадает в кольцевую камеру, разделенную на несколько частей и играющую роль пылеуловителя. Осевшая пыль отводится специальными трубами вниз и с помощью клапанов может быть примешана к воздуху, подаваемому в генератор.

Генератор фирмы «Kohle und Erz»

Фирмой «Kohle und Erz» предложен генератор с выпуском жидкого шлака и со швельшахтой для газификации каменного угля.

Большая часть газа с температурой 1100° отводится из зоны газификации. Примерно 25% газа проводится через швельшахту. Газ из швельшахты подвергается очистке для улавливания смолы и аммиака.

Состав швельгаза [143] примерно следующий: CO_2 — 2—4%, CO — 32—35%, H_2 — 17—20%, CH_4 — 2—3% и N_2 — 47—48%. Теплотворная способность — 1550—1813 *кал/м*³. Состав газа нижнего отъема: CO_2 — 0,8—1%, CO — 32—34% и H_2 — 1—2%.

При угле с теплотворной способностью в 7000 *кал/кг* выход газа составил 3,6 *м*³/*кг* и выход первичной смолы — 90 *г/кг*; в химическом тепле газа 64% тепла топлива, теплосодержание газа — 12%; из 1 *т* топлива получается 12 *кг* сульфата аммония.

Генератор фирмы «Koppers»

Фирма «Koppers» во избежание застывания шлака предлагает сжигать некоторую часть генераторного газа и за счет выделяемого тепла подогревать шлаки. Продукты сгорания паровым инжектором подаются в генератор, где углекислота восстанавливается в окись углерода.

Этот способ несовершенен и неэкономичен и распространения не нашел.

Использование генераторов с выпуском жидкого шлака для улавливания цветных металлов

Горючий газ получается также в шахтных печах металлургии цветных металлов, служащих для получения свинца, олова и меди. Восстановление окислов происходит частично за счет кокса, добавляемого в шихту в количестве, минимально необходимом для плавки, и частично за счет образующейся окиси углерода. Дутье применяется холодное во избежание слишком большой возгонки металла и уноса его с газом, хотя и при холодном дутье часть олова и свинца возгоняется, частично превращаясь в окись; часть возгона осаждается в верхней части печи и возвращается в нижнюю зону, а часть уходит с газом. Цинк, содержащийся в руде, целиком возгоняется и в виде окиси оседает в верхней части печи, вызывая через некоторый период остановку печи.

В случае работы генератора с выпуском жидкого шлака, с горячим дутьем, на смеси из топлива, бедных руд или отходов металлургических производств и известняка цинк, кадмий, свинец и олово при соответствующей температуре возгоняются, а топливо шихты газифицируется. Возгоняющиеся металлы уносятся с газами и выделяются при осушке газа преимущественно в виде окиси. Медь и сернистые соединения, содержащиеся в шихте, образуют легкоплавкий королек, состоящий из сернистой меди и сернистого железа. При шихте, содержащей много соединений железа, получается чугун с содержанием кремния, марганца, меди и фосфора [140].

Таким образом в подобном случае продуктами процесса являются: газ, возгоняемые окислы и чугун или сплавы.

Целесообразно брикетирование руды с применяющимся топливом — угольной, коксовой или антрацитовой мелочью. Шихта в этом случае состоит из брикетов с небольшой добавкой известняка и кокса.

При опытах, показавших возможность применения разнообразных руд и отходов, свинец, олово, цинк и кадмий возгонялись и выделялись при очистке газа; в некоторых случаях возгонялись серебро и марганец; теплотворная способность газа составляла 800—1240 *кал/м*³.

Работа генератора зависит от содержания в шихте нелетучего углерода, содержания металлов и температуры дутья; получение чугуна или сплава зависит от состава шихты и условий ведения процесса.

С 1927 г. во Франции работал газогенератор с возгонкой производительностью в 120 *т* в сутки, оборудованный фирмой «Fusion et Voltisation», связанной с фирмой «L'air chaud». Этот генератор пе-

рерабатывал отходы производства электролитического цинка в смеси с коксом и известняком. Позднее этот генератор был заменен другим с производительностью в 200 *т*, имеющим прямоугольное сечение 3,45×1,40 *м* и высоту в 6,9 *м*. Последний генератор имеет наружное водяное охлаждение, ряд охлаждаемых водой фурм и с одного конца летку. Отходы состоят преимущественно из феррита цинка — $ZnO \cdot Fe_2O_3$ с общим содержанием цинка в 30% и свинца — 7%; в виде осадка они задерживаются на барабанных фильтрах и смешиваются с коксовой мелочью; смесь подсушивается и брикетируется. Содержание нелетучего углерода в брикетах составляет около 16%. В генератор загружаются брикеты, смешанные с низкосортным коксом и известняком. Воздух подогревается до 550°. Газ из генератора проходит пылеуловитель, два мокрых скруббера и дезинтегратор Тейсена. Выделение возгона, состоящего преимущественно из окисей и частично из сульфидов, происходит в мокрых скрубберах и аппарате Тейсена. Улавливание осадков производится в отстойнике Дорра и на барабанном фильтре, подсушка их — в барабанной сушилке, отпаливаемой генераторным газом.

Средний состав исходных материалов — цинковых отходов: Zn — 20% (15% $ZnO \cdot Fe_2O_3$, 4% $ZnSO_4 \cdot H_2O$ и 1% ZnS), Pb — 7% ($PbSO_4$), Fe_2O_3 — 25—30%, S — 6—7%, SiO_2 — 7—8%, CaO — 2%, Cu — 1% (CuO) и Ag — 500 *г/т*. Содержание углерода в коксовой мелочи — 70% и в коксе — около 75%. Суточная загрузка: брикетов (60 *т*) и коксовой мелочи (15 *т*) — 75 *т*, кокса — 28 *т*, известняка — 17 *т*. Углерода в брикетах — 16% и в шихте — 26%.

В конечном продукте — концентрате, состоящем преимущественно из окисей цинка и свинца в смеси с сульфидами, — содержится: 50—60% Zn, 12—22% Pb и 6—8% S. Концентрат обрабатывается разбавленной серной кислотой; нерастворимый сернокислый свинец идет в продажу, а раствор сернокислого цинка возвращается в производство. Шлак и металлы из горна выпускаются в ковш каждые 30 мин. Шлак содержит много железа и идет в отвал. Металл застывает в ковше и потом идет в обработку как содержащий серебро. Состав металла: Fe — 50—60%, Cu — 3—5%, S — 25—27%, Zn — 1%, Ag — 2 *кг/т* и Au — следы. Состав шлака: SiO_2 — 35—45%, CaO — 28—35%, FeO — 5—20%, Al_2O_3 — 12—15%, ZnO — 0—1,5% и Pb — следы.

Выход газа содержащего 10% CO_2 и 25% CO, с теплотворной способностью в 800 *кал/м³* — 190 000—290 000 *м³/сутки*; выход шлака — 35—40 *т*, сплава — 15—18 *т*, концентрата — 20—22 *т*. Концентрат дает 10—12 *т* цинка и 4—6 *т* $PbSO_4$. Около 80 000 *м³* газа расходуется на подогрев воздуха и сушку. Остаток газа может быть использован под котлами. Экономический эффект работы генераторов зависит от местных условий.

Комбинирование процессов газификации и доменного в СССР

Вопросы комбинирования процессов газификации и доменного в СССР исследуются давно. В 1922/23 г. на Кулебакском и Выксунском заводах производились опыты плавок чугуна на смеси торфа и древесного угля и на одном торфе (144).

Применявшийся торф был малозолен. При повышении влажности торфа выше нормы в 30% процесс несколько нарушался, так как торф, попадая непросушенным в зону высоких температур, растрескивается и замусоривает горн. Средний состав газа: CO_2 — 8%, CO — 25%, H_2 — 14% (до 18%), CH_4 — 3,75% и C_2H_4 — 0,5%. Имело место значительное выделение с газом смол. Ход домны при работе на одном торфе хорошего качества был вполне нормален.

Торф сухой, но содержащий мелочь, давал худшие результаты, чем более влажный, но крупный.

В 1930/31 г. на Выксунском и Косогорском заводах были проведены опыты плавки чугуна на торфяном коксе с содержанием золы в 6—9%. Эти опыты дали на Выксунском заводе хороший результат. На Косогорском заводе результат был несколько худшим (но удовлетворительным) вследствие малой прочности кокса.

В 1931 г. опыты по плавке чугуна в домне на торфе были поставлены на Косогорском заводе. Опытная плавка на торфе в данном случае должна была дать ответ как на вопрос об использовании в домнах торфа, так и на вопрос об утилизации отходов сернокислотных производств.

Использование огарков, получаемых после обжига медьсодержащих уральских пиритов, дает возможность получить значительное количество железа (50—55% в огарках) и меди (1—1,5%). Домна имела высоту в 25 *м* и объем в 375 *м³*. При опытах применялся торф с влажностью до 25%, зольностью до 4% и степенью разложения в 35—50%. Размер торфин был следующий: 75 × 75 × 320 *мм*.

Материалом для агломерата, изготовленного на Косогорском заводе, послужили колчеданные огарки, загрязненные землистыми примесями. Среднее содержание железа в этом агломерате составляло 57% и кремнезема — около 14%; содержание серы доходило до 0,4%, содержание закиси железа составило в среднем 21% (16—24%).

Содержание фосфора в агломератах составляло от следов до 0,11%. Подсобной рудой в переходной шихте на передельный чугун служила криворожская с 59—61% железа, сильно пылеватая и довольно фосфористая (до 0,14% фосфора). При работе на литейной шихте употреблялись и местные руды — киреевская и призаводская — бедные бурые железняки с 42—40% железа, фосфористые и сильно порошковатые.

Флюсом служил известняк, чистый по составу, но непрочный. Согласно заключению комиссии, проводившей опыты, были сделаны следующие выводы.

При добыче торфа для доменной плавки необходимо выделить пласты торфа со степенью разложения в 35—65%. Торф должен содержать не более 30% влаги. Максимальный размер торфяного кирпича должен быть равен половине обычной длины при нормальном поперечном сечении.

Кирпичи должны быть прочные и без трещин. Удовлетворяющие требованиям кирпичи имеют большую поверхность, быстрее сохнут и коксуются, а также способствуют лучшему распределению шихты и газов в домне.

Торф применявшихся формы и размеров вызывал прогары и создавал рыхлую укладку и неравномерное распределение шихты и газов по сечению домны.

Шлак должен содержать 46—48% извести. Более кислые шлаки (42—46% извести) способствуют при горячем горне получению горячего передельного чугуна, содержащего много марганца и кремния.

Более основные шлаки (с 52% извести) дают хороший малосернистый мартеновский чугун, но они слишком трудноплавки для работы на торфе. Интенсивность плавки нужно поддерживать, исходя из расчета 1,1 *т* воздушносухого торфа в сутки на 1 $м^3$ полезной вместимости домны (примерно 1000 $кг/м^2 час$), с тем чтобы время пребывания торфа в генераторе составило 12—15 час., что уменьшает в полтора раза производительность сравнительно с работой на каменноугольном коксе.

Температура дутья должна быть близка к возможному максимуму (750—800°), так как такой нагрев является единственным средством концентрировать достаточный жар в горне для работы на основных шлаках. Давление дутья в 35—40 *см* рт. ст. при полезной высоте печи в 20,8 *м* является достаточным для работы на торфе, несмотря на временное появление некоторого количества мусора. Меньшее сопротивление печи, чем при торфяном коксе, свидетельствует о том, что торф на значительной высоте печи сохраняет форму крупных кусков. Сход колош при торфе более правилен, чем при торфяном коксе, хотя и наблюдались небольшие осадки.

Отрицательным явлением при работе на торфе явилось постепенное или периодическое замусоривание горна, прекращавшее спуск шлака через шлаковую летку, с последующим появлением шлака на фурмах и перерывом работы последних.

Для облегчения борьбы с замусориванием горна при работе на одном агломерате или с добавкой 50% криворожской руды оказалось необходимым прибавлять оборотный шлак и даже кремнистый материал с соответственным количеством флюса для доведения относительного количества шлака до 0,5—0,6.

Печь дважды переводилась на минеральный кокс для исправления ее состояния; во избежание неполадок стали в каждую смену систематически добавлять холостые колоши минерального кокса, на основании чего комиссия пришла к выводу, что постоянная работа домны возможна лишь при условии добавки кокса в размере примерно 5% от веса торфа.

Расход торфа при шихте из агломерата и руды на единицу мартеновского чугуна определился в 3,5—4. Полученный чугун был разнообразного состава, наряду с сернистым был получен горячий чугун мартеновской шихты, содержавший 1,5—3% марганца и 4,64% кремния.

Комиссия сделала вывод, что плавка на торфе допускает получение чугуна желаемого состава.

Шлаки, полученные при опытах, отличались от обычных только низким содержанием сернистого кальция и несколько меньшей основностью. Состав газа соответствовал обычному газогенераторному. Средние пределы колебаний состава газа характеризуются табл. 60.

Таблица 6

Средние пределы колебаний состава газа за отдельные периоды опыта

Топливо / Состав газа	Торф	Торф с малой добавкой кокса	Кокс		Торф с добавкой кокса	
CO_2	10—12	9—10	8—10	7—8	7,5—10	10—11,5
C_2H_4	0,3—0,8	0,5—0,7	—	—	0,2—0,4	0,4
CO	27—29	28—30	29—31	31—33	30—32	28,5—30,5
CH_4	2,4—3,4	1,0—1,8	0,4—0,5	0,2—0,25	1,5—3,5	2,0—3,5
H_2	9—10	11—12	3,0—3,6	1,5—2,5	7—10	8—10,5

Выход газа на 1 *кг* абсолютно сухого торфа колебался в пределах 2,16—2,52 $м^3/кг$. Количество полученной смолы не превышало 6% от веса абсолютно сухого торфа. В смоле содержалось большое количество твердых примесей, в том числе золы 7,8—16,2% от веса сухой смолы.

Опыты в СССР по плавке чугуна на торфе с дутьем, обогащенным кислородом

В 1933 г. в Чернореченском химическом комбинате комиссией по выплавке чугуна на торфе при президиуме Мособлисполкома совместно с Институтом азота были проведены опыты газификации торфа в опытной домне Института азота [145].

Домна имела цилиндрический профиль, 4 фурмы и следующие размеры: общая высота — 13,14 *м*, полезная высота — 11,14 *м*, высота шахты — 8 *м*, диаметр шахты — 1,7 *м*, диаметр горна — 1,5 *м* и полезный объем — 24 $м^3$.

Смешение кислорода с воздухом и подача смеси в домну производились паровой воздуходувкой в 75 л. с., с максимальным числом оборотов 100 и давлением в 1 *ат*.

Кислород имел среднюю концентрацию в 61—65% и являлся отбросом производства.

Торф с Орловского болота, применявшийся в виде кирпичей нормальных размеров, содержал 13,7—33,2% влаги (в среднем 23%) и 4,14—9,84% золы (в среднем 7,62%). Состав золы колебался в следующих пределах: SiO_2 — 42,25—54,59%, полуторных окислов — 27,06—35,25%, извести — 14,16—21% и серы — 3,12—4,3%.

Плавка велась на смеси криворожской и бакальской пылеватых руд (до 60% пыли и мелочи).

Содержание кислорода в дутье колебалось в пределах 30—60%; влажность его составляла до 1%; температура дутья вследствие ком-

прессии составляла 40—50°. Иногда при работе на 60%-ном кислороде в дутье добавлялся пар с температурой в 160°.

Затруднения при налаживании работы заключались в согласовании процесса коксования торфа с металлургическим процессом. Увеличенные скорости схода колош вызывали повышение содержания закиси железа в шлаке и в результате — повышение содержания серы в чугуне. Кроме того имели место расстройства хода при форсировке процесса в целях выявления высшего предела скорости процессов коксования и образования чугуна. Вообще же печь работала очень ровно и без зависаний. Даже при резких изменениях — до 10% и выше — в содержании кислорода, что соответствует колебанию теоретической температуры в горне до 500°, печь продолжала работать совершенно спокойно. Случаев замусоривания горна не наблюдалось. Кокс получался в больших кусках и прочный.

Нормальный состав колоши на литейный чугун был следующий: торфа — 2000 *кг*, криворожской руды — 400 *кг*, бакальской руды — 200 *кг*, известняка — 160 *кг* и песка — 15 *кг*. Количество шлака было установлено в 0,8—1 к единице чугуна.

Когда процесс был изучен, получились стандартные чугуны; нестандартные получались только при перебоях, вызывавшихся неисправностью оборудования.

При переходе на торф с влажностью до 60% температуры в распаре сильно понизились, что не отразилось на ходе коксования, но расстроило металлургическую часть процесса. Во время продувки леток было замечено небольшое количество мусора.

Состав газа изменялся с концентрацией кислорода в дутье. При 40% кислорода в дутье состав газа был следующий: CO — 44,3%, O_2 — 0,2%, CO_2 — 12,9%, H_2 — 11,6%, C_mH_n — 1,1%, CH_4 — 3,9% и N_2 — 26%; теплотворная способность (калориметрическая) — 2260 *кал/м³*; выход газа на 1 *т* воздушносухого торфа — 1100 *м³*. Состав газа при 49% кислорода в дутье: CO — 47,5%, O_2 — 0,15%, CO_2 — 11,4%, H_2 — 11,7%, C_mH_n — 1%, CH_4 — 4,9% и N_2 — 22,3%; теплотворная способность — 2440 *кал/м³*; выход газа — 1000 *м³/т*. Состав газа при 58,5% кислорода в дутье: CO — 51%, CO_2 — 13,1%, H_2 — 14,9%, C_mH_n — 0,9%, CH_4 — 4,5% и N_2 — 26,3%; теплотворная способность — 2630 *кал/м³*; выход газа — 930 *м³/т*.

Выход смолы составлял 10% от веса абсолютно сухого торфа. Пыли в смоле было 10% от веса смолы.

Состав чугунов сильно колебался, а именно: кремния — 2—8,85% марганца — 0,5—5,28% и серы (в стандартных чугунах) — 0,008—0,06%.

При нормальной работе печь давала до 7—7,5 *т* чугуна в сутки, в среднем — 6 *т*. Расход горючего составлял 6 *т* на 1 *т* чугуна, т. е. 36 *т/сутки* (782 *кг/м² час* — на воздушносухое топливо и 164 *кг/м² час* — на торфяной кокс).

Опытами было также выявлено, что максимальная скорость прохождения шихты через печь без нарушения металлургической стороны процесса — 6 час., что печь работает нормально при понижении температуры в распаре до 500° (при коксе — 1000—1100°) и что влажность торфа не должна превышать 25—30%.

Регулирование режима производилось путем изменения содержания в дутье кислорода и не представляло затруднений. Повышенное содержание кислорода в дутье вызывало концентрацию высоких температур в небольшой по высоте зоне над фурмами. Это позволяло выпускать шлаки с содержанием около 60% извести и 27% кремния. В основных шлаках (53—59% извести) при повышении концентрации кислорода в дутье усиливалось образование карбидов кальция. Шлак содержал до 12% карбида кальция.

Торфяной кокс над фурмами был чист и свободен от капелек расплавленного шлака, и распар имел температуру у стен в 500—600°, что заставляет предполагать смещение шлакообразующей зоны в области горна. Окисление металла было ниже обычного. В процессе выплавки литейных чугунов были получены чугуны с содержанием до 9% кремния, т. е. бедные ферросилиции, и при добавке марганцевой руды — бедные силикашпигели.

Опыты указали на возможность получения при работе с выпуском жидких шлаков на парокислородном дутье при высокой форсировке процесса одновременно ценного газа и ферросплавов. При смолистых топливах, каковым является торф, дополнительным ценным продуктом является смола. Работа вполне возможна на одном торфе даже с повышенным содержанием золы (до 10%).

Грануляция шлака

Получаемый в генераторе жидкий шлак подвергается грануляции. Существуют три метода грануляции жидкого шлака: мокрый, сухой и полусухой.

При мокрой грануляции охлаждение шлака и грануляция его производятся водой. Для этой цели мокрые шлаки приводят в соприкосновение с водой; при этом они растрескиваются и распадаются на зерна различных размеров. Соприкосновение с водой достигается выпуском шлака в бассейн с водой или подводом в жолоб. Полученный по этому способу гранулированный шлак имеет влажность в 25—35%.

Сухая грануляция производится сжатым воздухом. По этому способу жидкий шлак поступает по жолобу в наклонный вращающийся барабан и при стекании с жолоба подвергается воздействию сжатого воздуха, превращающего его в отдельные зерна, которые затем при вращении барабана перетираются друг о друга и о стенки барабана. Из барабана гранулят попадает на сито и в бункер. Охлаждение в этом случае достигается воздухом, отчасти водой, а также поливкой барабана снаружи. Влажность получаемого гранулята составляет 1—10%.

Взамен вращающегося барабана может быть применена мельница, состоящая из нескольких дисков различной величины, вращающихся вместе с валом, на который они насажены; диски помещены в чугунный кожух. Жидкий шлак разбивается при входе в аппарат струей воздуха на мелкие капли; капли застывают и падают на вращающиеся диски, которые отбрасывают их к стенкам и раздробляют на мелкие зерна.

При полусухом способе на шлак, текущий по жолобу, наливается вода с таким расчетом, чтобы шлак стекал с конца жолоба в тестообразном состоянии. Стекающий с жолоба шлак попадает под действие струи сжатого воздуха, раздробляющей его на мелкие части. Влажность получаемого гранулята — 5—7%.

Гранулят, получаемый мокрым способом, в ряде случаев использования подвергается подсушиванию, что связано с излишними по сравнению с другими способами расходами.

Область применения и преимущества генераторов с выпуском жидкого шлака

В генераторах с выпуском жидких шлаков можно использовать колчеданные огарки, многозольные топлива с железистой золой, в том числе сланцы, являющиеся отбросом при добыче угля. В них также можно получать цветные металлы из бедных руд и отходов, что особенно выгодно при наличии комплекса металлов, часть которых может возгоняться, а часть переходить в сплав с чугуном. Этим путем могут быть переработаны цинковые отходы из реторт и отвалы цинковых и свинцовых рудников.

Особые преимущества имеет применение генераторов с выпуском жидкого шлака при богатом кислородном дутье. В этом случае можно допускать развитие высоких температур в нижней части генератора, получить ценные сплавы — специальные чугуны, которые в обычных условиях доменного процесса получить трудно, и избежать подогрева дутья.

Генераторы с выпуском жидкого шлака имеют также то весьма ценное преимущество, что они допускают использование неочищенного газа из топлив, содержащих серу, потребителями, чувствительными к наличию серы в газе. В верхних и нижних слоях топлива сера связывается известью и соединениями железа.

Подводя итоги, следует указать, что генераторы с выпуском жидкого шлака имеют следующие преимущества:

1. Интенсивность газификации, уменьшающая количество устанавливаемых единиц и капитальные затраты.
2. Возможность применения для газификации топлив с легкоплавкой золой.
3. Отсутствие необходимости в применении специальных механизмов для удаления остатков и уменьшение ручного труда на шуровку.
4. Хороший выжиг остатков.
5. Возможность использования топлив с высоким содержанием золы, бедных руд и отходов металлургических и других производств с получением побочных продуктов — шлака и металла.
6. Отсутствие затруднений в использовании дутья, обогащенного кислородом, и возможность получения газа, не содержащего водорода.
7. Получение газа, свободного от сернистых соединений, и топлив с значительным содержанием серы.

Недостатком этих генераторов является:

1. Большой унос пыли, ограничивающий выбор топлива.
2. Замусоривание горна непрочным топливом.
3. Большой износ футеровки нижней части генератора.
4. Возможность застывания шлака.
5. Необходимость подбора и добавки большого количества флюсов, несколько компенсирующаяся возможностью использования получаемых чугуна и шлака.

14. ГАЗОГЕНЕРАТОРЫ ВЫСОКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

В связи с увеличением размеров газогенераторных станций большой интерес приобретают генераторы высокой производительности.

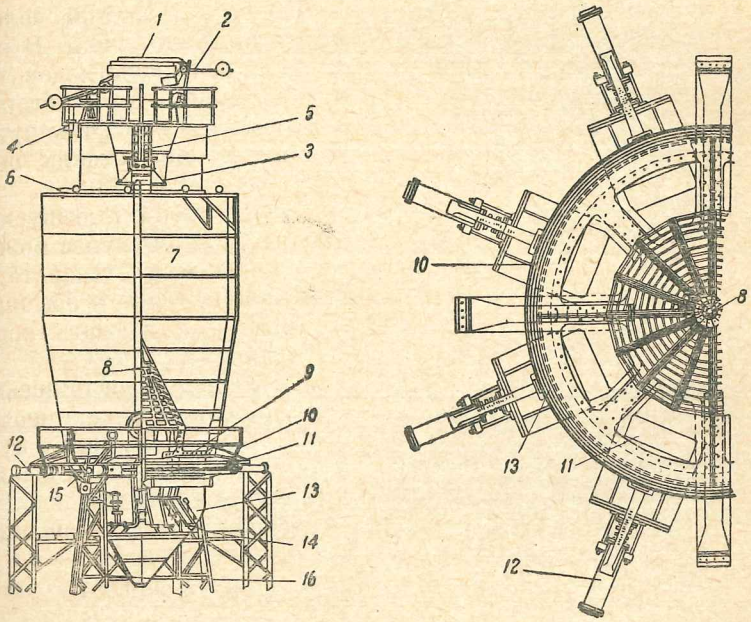


Рис. 112. Генератор системы Ричи-Гоцо:
1—крышка загрузочной коробки, *2*—рычаг для крышки с гидравлическим приводом, *3*—конус коробки, *4*—рычаг конуса с гидравлическим приводом, *5*—ручной рычаг конуса, *6*—затворы шуровочных отверстий, *7* шахта генератора, *8*—пирамидальная решетка, *9*—опорные кронштейны решетки, *10*—опорное кольцо решетки, *11*—верхние клапаны зольных карманов с гидравлическим приводом для спуска золы в карманы, *12*—гидравлические цилиндры верхних клапанов карманов, *13* -зольные карманы, *14*—нижние клапаны зольных карманов для спуска золы в зольный бункер, *15*—рычаг нижних клапанов зольных карманов с гидравлическим приводом, *16*—ручной рычаг нижних клапанов

С увеличением диаметра газогенератора ухудшается распределение дутья по сечению и уменьшается равномерность схода золы и шлака. Поэтому при увеличении диаметра генератора следует применять специальные конструкции решеток, обеспечивающие равномерность работы генератора, хорошее состояние огневого слоя и хорошую проницаемость золы.

В настоящее время в СССР наибольший диаметр генератора равен 3,6 *м*.

Проектируемые в СССР газогенераторы большого диаметра с твердым золоудалением снабжаются автоматическими загрузочными и шуровочными приспособлениями (равномерность распределения и состояния топлива), механическим сухим золоудалением (высокое давление), решетками кратерного типа с мелкими отверстиями (равномерное распределение дутья, секционный отвод золы — с периферии и по среднему кольцу) и шахтой, охлаждаемой экранными трубками.

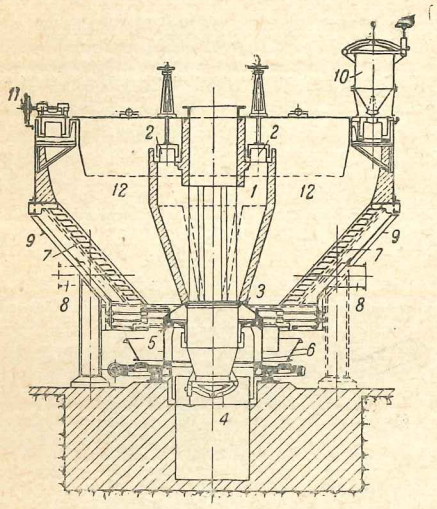


Рис. 113. Генератор Тренклера с кольцевой ступенчатой и вращающейся решеткой:

1 газосборник—пылеуловитель, *2*—клапаны, *3*—неподвижная средняя часть решетки, *4*—клапан для спуска пыли, *5* - обойма с шарами, *6* - вращающаяся часть решетки, *7*—ступенчатая решетка, *8*—подвод дутья, *9*—уплотняющий кожух, *10*—загрузочная коробка, *11*—приспособление для перемещения загрузочной коробки, *12* - отдельные камеры генератора

За границей имеются генераторы диаметром в 5 *м* с неподвижной или вращающейся решеткой для получения смешанного и водяного газов.

На рис. 112 представлен генератор Ричи-Гоцо диаметром в 5 *м* с неподвижной решеткой.

Удаление золы производится с помощью 8 шиберов, расположенных по окружности высокой пирамидальной решетки. Производительность генератора — примерно 150 *т* многозольного бурого угля или торфа в сутки (подробнее — см. ч. 2, гл. II и III).

Генераторы диаметром около 5 *м* с решеткой Лимна — Рамбуша работают на станции водяного газа в Биллингеме (см. часть 2, гл. VI).

К числу генераторов большой производительности следует также отнести генераторы с выпуском жидкого шлака и генераторы Винклера, газифицирующие мелкозернистое топливо.

Некоторые заграничные предложения конструкций генераторов большого размера идут по пути увеличения площади решеток путем устройства кольцевых генераторов и комбинирования вращающейся решетки со ступенчатой.

Кольцевой генератор [143] с площадью сечения в 75 $м^2$, снабженный кольцеобразной решеткой и четырьмя газоотводными отверстиями, ведущими в общий газопровод, строившийся фирмой «Пинч», предназначался для получения газа по способу Монда из низкосортного каменного угля с 15,4% золы, 17,6% влаги и 0,72% азота при размере кусков в 10—25 *мм*. Проектная производительность генератора составляла 240 *т/сутки*. Данные о работе неизвестны.

При устройстве генератора, согласно рис. 113, полезная поверхность решетки генератора увеличивается в несколько раз путем комбинации вращающейся решетки со ступенчатой [118]. Пространство

газификации разделено на несколько камер, которые могут быть включены и выключены без нарушения работы генератора в целом.

Средняя коническая часть вращающейся решетки неподвижна, и на ней помещаются чугунные кронштейны, несущие промежуточные стены отдельных камер. С помощью обоймы с шарами неподвижная коническая часть решетки центрирует вращающуюся часть. Ступенчатая решетка имеет наклон в 50° (больший, чем угол естественного откоса) и широкие перекрытые щели. Подвод дутья осуществляется через кожух под ступенчатую решетку.

Пространство над неподвижной частью решетки, внутри генератора, является газосборником и пылеуловителем и соединяется с каждой камерой генератора при помощи клапанов с плотными затворами. Предложенным путем может быть осуществлен генератор, сохраняющий испытанный способ удаления золы при помощи вращающейся решетки и с значительно большей площадью сечения шахты и решетки, чем обычные генераторы с вращающейся решеткой.

Повидимому должно представить затруднения достижение равномерной работы генератора.

15. ГАЗОГЕНЕРАТОРЫ ДЛЯ ПЫЛЕВИДНОГО И МЕЛКОЗЕРНИСТОГО ТОПЛИВА

Преимущества применения мелкозернистого топлива и пыли

Все увеличивающееся в последние годы применение отбросов и местных топлив, часто весьма непрочных, легко выветривающихся и распадающихся, а также дающих после сухой перегонки непрочный, легко распадающийся кокс, выдвинуло проблему нахождения типа генератора, в котором мелкое топливо можно было бы газифицировать с достаточным эффектом в отношении качества газа и производительности генератора.

Стоимость топлива составляет весьма значительную часть себестоимости газа, и применение менее ценных топлив для газификации должно дать значительный эффект в отношении уменьшения стоимости газа. Поэтому проблема использования мелких распадающихся топлив важна не только с точки зрения увеличения народнохозяйственных ресурсов, но и с точки зрения удешевления стоимости газа. Большое значение имеет и то обстоятельство, что применение пылевидного или мелкозернистого топлива в некоторых случаях решает также вопрос создания генераторов высокой производительности.

При газификации пылевидного или мелкозернистого топлива возможно получение тех же видов газов, что и при обычных топливах, т. е. возможна их газификация с помощью воздуха, пара, паровоздушной смеси, чистого кислорода, обогащенного кислородом воздуха и углекислоты.

Следует отметить наличие ряда преимуществ в газификации мелкозернистого топлива сравнительно с пылевидным. Мелкозернистое топливо позволяет применять более высокую интенсивность дутья без опасения уноса частиц топлива газами. Оно увеличивает путь и продолжительность движения для более мелких частиц топлива, уноси-

мых газом. Условия обтекания газами кускового топлива более благоприятные. Возможно использование отбросных топлив без их предварительного перемола, являющегося дорогостоящей операцией.

Применение мелкого топлива в генераторах обычных конструкций

Мелкие топлива с малым содержанием пыли при однородном размере кусков довольно хорошо могут газифицироваться в обыкновенных генераторах, однако производительность последних мала. Применение генераторов высокого давления с разделением воздушного дутья на мелкие равномерно распределенные струи не является достаточным решением вопроса вследствие затруднительности ведения режима, несмотря на хорошие результаты в отдельных случаях [146]. Пфейфером на Будапештском газовом заводе в генераторе высокого давления диаметром в 2,6 *м* при применении коксовой мелочи размером в 5—10 *мм*, с содержанием в 69,9% C, 19,48% золы и 7,36% H_2O был получен газ состава: 5,1% CO_2, 26,26% CO, 1,1% CH_4, 10,82% H_2 и 56,56% N_2, с низшей теплотворной способностью в 1171 *кал/м³*. Выход газа составлял 3,7 *м³/кг*, и производительность генератора — 508 *кг/час*, что соответствует напряжению поперечного сечения в 96 *кг/м² час*. Расход пара составлял 0,484 *кг* на 1 *кг* топлива. Температура газа составляла 315°. В теплотворной способности газа было 67,75%[1] теплотворной способности топлива; в горючем (в золе) — 6,88%, в пыли — 0,42%, в тепле нагрева газа — 5,55% и в потере в окружающую среду — 15,46%.

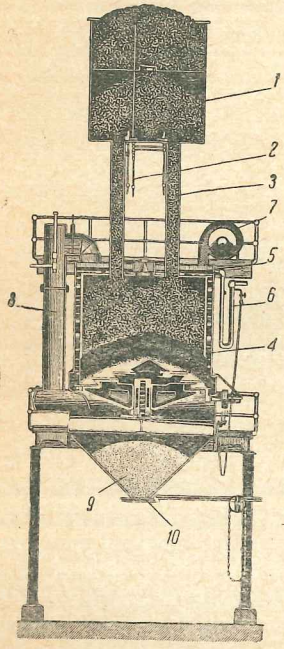


Рис. 114. Генератор Вельмана-Галуша:

1—бункер с горизонтальной перегородкой, *2*—штанга, указывающая уровень топлива в бункере, *3*—труба, связывающая бункер с генератором, *4*—охлаждающий кожух, *5* охлаждаемая водой крышка, *6*—сливная труба, *7*—воздушный вентилятор, *8*—воздухопровод к решетке, *9*—зольный бункер, *10*—клапан бункера

Другие данные о работе на мелком топливе обыкновенных и высокого давления генераторов приведены в табл. 61 и гл. V.

Для газификации мелких сортов топлив (антрацита размером от 5 до 15 *мм* и коксовой мелочи) за границей в последнее время начали применять генераторы системы Вельмана-Галуша, имеющие своеобразный питатель, охлаждающую рубашку во всю высоту шахты, связанную с охлаждаемой водой крышкой, и больших размеров решетку с сухим золоудалением.

Генератор (рис. 114) снабжен бункером, разделенным горизонтальной перегородкой. Нижняя часть бункера сообщается с газо-

[1] Расчет — по высшей теплотворной способности.

Таблица 61

Данные по газификации мелкозернистых топлив

Тип генератора	Род топлива	Состав топлив: H_2O	Состав топлив: зола	Теплотворная способность (в *ккал/кг*)	Размер кусков топлива (в *мм*): <1 %	1—5 %	5-12 %	>12 %	Производит. (в *кг/м² час*)	Состав газа: CO_2	CO	CH_4	H_2	Низшая теплотвор. способн. (в *ккал/м³*)
Генератор G. M. B. H. (Dresden)	Богемский бурый уголь 0—10-*мм*	30	7	4500	—	—	—	—	79	5,1	25,2	2,3	16,5	1409
	Антрацит 0—4-*мм*	13,5	16	5520	—	—	—	—	53	4,8	22,3	—	—	—
	Биттерфельдский рядовой уголь	4,68	7	2750	—	—	—	—	53	10,5	22,7	1,7	12,7	1175
	Отбр ос дымогарных котлов	2,9	19,2	6070	—	—	—	—	—	5,0	26,0	0,2	12,0	1110
Генератор Пинча для мелочи	Коксовая мелочь	12	17	5620	20	41	30	9	110	2,4	32,5	0,6	12,3	1155
	»	15	15	5570	34	50	16	—	105	5,9	26,1	0,6	11,3	1130
	Каменноугольная мелочь	9	15	5650	11	50	34	5	130	5,2	26,7	1,9	15,0	1350
	»	33	14	3250	8	46	41	5	125	7,0	27,4	2,5	18,3	1520
Генератор высокого давления Керпели	» (лигнит)	20	12	4560	4	71	23	2	105	10,0	21,9	2,0	22,2	1410
	Антрацит — мелочь	8	20	5800	6	44	29	21	170	4,3	28,3	0,3	11,0	1160
	Бурый уголь	20,3	11,4	4526	3,7	71,3	23,2	1,8	101	10,0	21,9	2,0	22,2	1408
Генератор Керпели	»	33,0	14,0	3158	7,9	46,0	41,1	5,0	130	7,0	27,4	2,5	18,3	1517

генератором четырьмя стальными трубами, по которым топливо по мере газификации в генераторе спускается в последний. Между верхним и нижним отделениями бункера имеется газонепроницаемая дверца. Подобные же дверцы могут прикрывать вверху каждую трубу. Обычно дверцы труб открыты, но при необходимости загрузки топлива в нижнее отделение бункера их прикрывают, и тогда открывают дверцу перегородки бункера для пересыпания топлива из верхнего отделения бункера в нижнее. Дверцы труб и перегородки связаны механизмом, не допускающим их одновременного открытия.

Топливо спускается в генератор непрерывно, высота слоя топлива постоянна и равномерна, пыления и сепарации топлива не происходит, температура газа низка. В некоторых случаях это позволяет отказаться от применения скрубберов и газовых вентиляторов и при необходимости в хорошо очищенном газе ограничиться простыми скрубберами.

Воздух насыщается паром в охлаждаемой водой крышке, связанной с охлаждающей рубашкой.

Специальные конструкции генераторов для пыли и мелкого топлива

Тимм предложил сжигать во вращающейся печи топливо в пылевидном состоянии до CO_2 и затем восстанавливать в CO. Предложение его не получило практического осуществления.

В последнее время техническая мысль стала на путь газификации топлива в интенсивно движущемся токе газов или во взвешенном состоянии.

Из подобных более старых предложений следует указать на генератор Хирта, в кольцевую камеру которого в нижней части тангенциально вдувается смесь угольной пыли и воздуха. В середине по высоте камеры у местного сужения к раскаленным газам добавляется четырьмя соплами пар, понижающий температуру газа в результате взаимодействия с уносимыми частицами раскаленного топлива. Процесс газификации заканчивается в верхней части кольцевой шахты. Газы отводятся через внутреннюю камеру.

Из других подобных более новых предложений применения в генераторах пыли или мелкосортного топлива следует отметить предложения Геллера и Винклера, подвергшиеся опытной и промышленной проверке и описанные ниже.

По способу, предложенному Балеем [147], при получении водяного газа из пылевидного топлива тепло, необходимое для подогрева смеси угольной пыли и перегретого пара, приобретается в регенеративных камерах, выложенных насадкой.

Уголь распыливается током сильно перегретого пара и падает на поверхность кокса или насадки с температурой 1400—1600°. Пыль разлагается, остающиеся частицы коксовой пыли дают с водяным паром водяной газ, происходит быстрая газификация без образования кокса. Этот способ может быть изменен таким образом, что перегретый пар непосредственно получается в насадке. Смесь водяного газа и продуктов перегонки пропускается через раскаленный регенератор и коксовый генератор, масса которого нагрета выше 1400°, и

смола разлагается. Полученные газы подводятся в котлу-утилизатору, оттуда к фильтру, где задерживаются угольные частицы, и далее к местам потребления. При опытах в 1906 г. из 1 *кг* угля с теплотворной способностью в 7650 *кал/кг* получалось 1,65 $м^3$ газа с теплотворной способностью 4100 *кал/*$м^3$.

Опыты получения водяного газа из буроугольной пыли производились Герцбергом [129]. В вертикальную камерную, обогреваемую снаружи, печь сверху вдувалась буроугольная пыль; пар подавался снизу. Из 1 *т* пыли с влажностью в 10% получалось 2200 $м^3$ газа состава: CO_2 — 6,1%, C_mH_n — 0,7%, O_2 — 0,4%, H_2 — 48,4%, CO — 33,5%, CH_4 — 4,7%, N_2 — 6,2%, с высшей теплотворной способностью в 2800 *кал/*$м^3$. В последние годы в СССР проведен и находится в стадии организации ряд опытов по газификации пыли и мелкозернистого топлива.

Генератор Геллера

В последние годы были произведены опыты получения водяного газа из пылевидного топлива в генераторах непрерывного действия системы Геллера [148].

Генератор Геллера имеет вид лежащего цилиндра и состоит из комбинации нагревательных и газовых камер, разделенных вертикальными стенками.

Подобный опытный газогенератор, состоящий из двух газовых камер и трех нагревательных, осуществленный на берлинском газовом заводе, представлен на рис. 115а и б.

Нагревательные камеры *2*, более широкие (350 *мм*), чем газовые *1* (250 *мм*), охвачены парой кольцевых каналов *3*, через которые проходят подогретые до 500° газ и воздух. Газ и воздух поступают в камеры через тангенциально направленные парные сопла *4*. Продукты сгорания отводятся вверху через дымоход *5*. Газовые камеры *1* сообщаются отверстиями *7* с коллектором газа *6*. Водяной газ отводится каналом *8*.

На рис. 115б представлен разрез по газовой камере. Кладка цилиндра снабжена отверстиями *9*, через которые подается перегретый пар; через сопло *10* вдувается горючая пыль, образующая при температуре выше 1000° водяной газ. Очажные остатки, находящиеся в пылевидном состоянии, увлекаются вместе с газом и осаждаются в циклоне. Имеющийся в опытном газогенераторе отвод *11* для золы и шлака в нижней части шахты оказался ненужным.

Угольная пыль подается паровым инжектором в трубку из огнестойкого металла и из последней тангенциально — в газовую камеру. В камере имеет место интенсивное вращательное движение водяного пара и угольной пыли, и получается водяной газ.

Схема работы опытной установки следующая. Воздух в подогревательную камеру подается вентилятором через трубчатый подогреватель и рекуператор. Рекуператор разделен внутри на две части: одна половина служит для подогрева воздуха, другая для подогрева газа. Воздух и газ подогреваются до 600°. Продукты сгорания с температурой 1200° поступают в рекуператор, потом обтекают воздухоподогреватель и удаляются вентилятором в дымовую трубу.

Полученный водяной газ, имеющий температуру 700—900°, отводится к футерованному циклонному пылеотделителю, где большая часть взвешенной золы выделяется. Отсюда газ проходит пароперегреватель, обогреваемый за счет физического тепла газа. Окончательные охлаждение и очистка газа от пыли происходят в промывателе. Очищенный газ нагнетается через счетчик в магистраль водяного газа.

Генератор может отапливаться получаемым водяным газом.

Проведенные в течение нескольких недель опыты указали на полную техническую возможность процесса. Затруднения встретились преимущественно в очистке газа от пыли и подводе пыли в генератор.

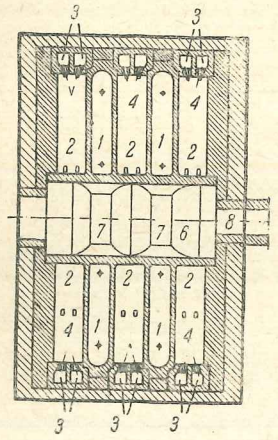


Рис. 115а. Генератор Геллера

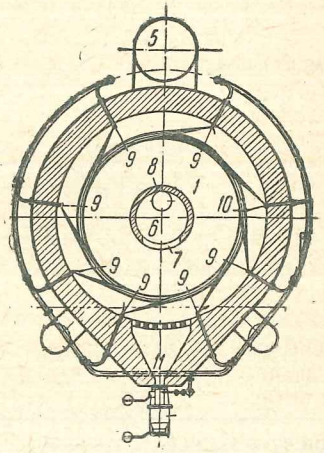


Рис. 115б. Газовая камера генератора Геллера

Может быть принято, что при данном способе получения водяного газа из 1 *кг* бурого угля, высушенного до содержания 15% влаги, можно получить 2 *м*³ водяного газа, а из 1 *кг* кокса с 2% влаги — 2,5 *м*³. Газ состоит из 50—55% H_2 и 30—40% CO и имеет теплотворную способность в 2400—2800 *кал/м*³.

Данные о работе опытной установки приведены в табл. 62.

Генераторы Винклера

Значительных успехов в газификации мелкозернистого топлива добились в Германии на заводах фирмы «I. G. Farbenindustrie» на генераторах Винклера (рис. 116).

По патентам фирмы и другим данным, дутье подается со значительной интенсивностью в генератор снизу через большое количество мелких отверстий, распределяется равномерно по сечению генератора и приводит весь слой топлива высотой в 1,4 *м* в движение, напоминающее движение кипящей жидкости. Кусочки топлива как бы плавают в подвижной среде, в которой они то выбрасываются кверху, то падают вниз.

Таблица 62

Данные по газификации различных топлив в генераторе Геллера

Показатели	Уголь	Лигнит	Лигнитовый кокс
Технический анализ (в %):			
влаги	1,30	10,85	—
летучих	25,60	—	—
золы	12,00	8,56	—
беззольного кокса	61,10	—	—
Итого	100,00	—	—
Элементарный анализ (в %):			
углерода	71,00	60,25	69,50
водорода	4,60	4,82	1,70
серы	2,20	0,47	1,78
азота	1,40	0,87	0,60
влаги	1,30	10,85	5,00
золы	12,00	8,56	20,72
кислорода	7,50	14,18	0,70
Итого	100,00	100,00	100,00
Теплотворная способность (в *кал/кг*)			
низшая	6848	5680	5875
высшая	6953	6000	5960
Производительность топлива:			
в 24 часа (в *т*)	1,70	1,87	1,642
в час (в *кг*)	70,80	78,00	68,50
водяного газа (в *м*³):			
в 24 часа	4560	4640	4780
в час	190	193	199
Выход водяного газа (в *м*³/*кг*)	2,68	2,48	2,92
Генераторный газ для нагревания:			
высш. теплотв. способн. (*кал/м*³)	1200	1160	1180
потребление в 24 часа (в *м*³)	6120	8730	8250
потребление на 1 *м*³ водяного газа (в *м*³)	1,34	1,88	1,72
Потребление пара:			
давление (в *кг/см*²)	3,60	3,20	3,80
расход в 24 часа (в *кг*)	1530	2135	2455
» в 1 час (в *кг*)	63,60	89,00	102,50
» на 1 *кг* топлива (в *кг*)	0,90	1,14	1,48
давление в соплах (в *кг/см*²)	0,80	0,70	1,10
средняя температура перегрева пара (в °С)	370	385	380

(продолжение табл. 62)

Показатели	Уголь	Лигнит	Лигнитовый кокс
Температуры и давления:			
Средняя температура (в °С):			
в газовой камере	970	995	990
водяного газа	1020	1035	1000
отходящих газов при входе в рекуператор	1165	1180	1180
воздуха для горения	640	680	650
генераторного газа	720	810	805
дымовых газов у трубы	155	165	150
давление в реакционной камере	−3	−4	−6
» » подогревательн. камере (в *мм* вод. ст.)	−3	−3	−4
Состав отходящих газов (в %):			
CO_2	19,6	18,8	19,2
O_2	0,5	1,2	1,2
N_2	79,9	80,0	79,6
Итого	100,00	100,00	100,00
Данные по водяному газу			
Состав (в %):			
H_2S	1,2	—	—
CO_2	7,0	9,8	8,2
O_2	0,2	0,4	0,2
CO	31,4	27,6	33,8
H_2	53,2	51,8	53,6
CH_4	1,4	5,0	0,4
N_2	5,6	5,4	3,8
Теплотворная способность (в *кал/м³*):			
подсчитанная	2630	2895	2700
замеренная	2700	—	—
Содержание пыли (в *г/м³*)	0,165	0,038	0,032
К. п. д. генератора	64,5	63,0	66,2
Термический к. п. д.	61,0	58,8	61,4

В результате имеют место хорошее перемешивание топлива и газов и равномерное и интенсивное протекание процесса. Крупных кусков шлака не образуется, так как происходит постоянное перемешивание и выравнивание температуры слоя; кроме того, так как удельный вес шлака больше удельного веса угля, шлак быстро падает на решетку и охлаждается на ней поступающим воздухом. Не происходит также и спекания угля, так как свежезаброшенное топливо попадает в слой раскаленного кокса, по которому равномерно распределяется и в который погружается.

Явление движения частиц, подобное движению жидкости, объясняется тем, что частицы топлива бурно выделяют газы и поэтому

окружены газовой пленкой, допускающей легкое перемещение частиц друг около друга.

Винклер впервые наблюдал движение мелких частиц угля при интенсивном дутье смеси газа и воздуха в трубке, в которой слой топлива имел высоту в 10 *см* и лежал на решетке из кусков огнеупорной глины, уменьшающихся по размеру кверху.

Вначале с увеличением скорости газов слой топлива приходит в движение и возникает явление кипения или бурления. С дальнейшим увеличением скорости газов появляются выбросы, затем слой поднимается, образуя аэровзвесь.

После соответствующих исследований был построен генератор сначала с решеткой площадью в 4 $м^2$ и позднее — с площадью в 12 $м^2$.

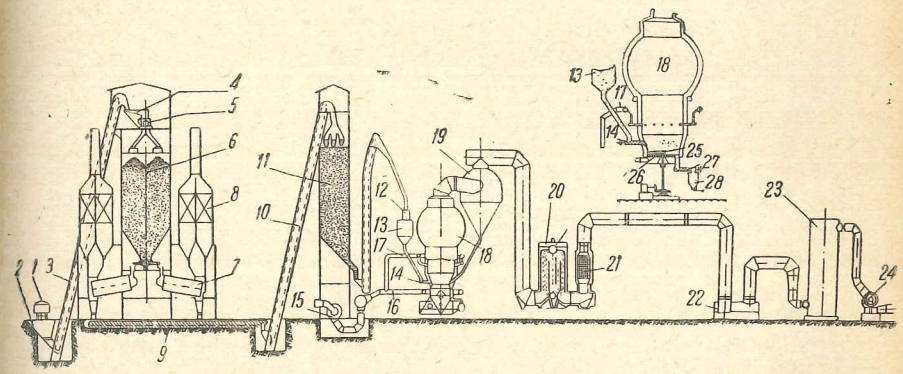


Рис. 116. Установка Винклера:

1—железнодорожный вагон с топливом, *2*—приемный бункер, *3*—элеватор, *4*—грохот, *5*—дробилка, *6*—бункер для сырого бурого угля, *7*—трубчатая сушилка, *8*—фильтр, *9*—транспортный шнек, *10*—элеватор, *11*—бункер для сухого бурого угля, *12*—весы, *13*—вспомогательный бункер, *14*—шнек для подачи топлива в генератор, *15*—воздушный вентилятор, *16*—подвод воздуха у основания генератора, *17*—подвод воздуха в свободную часть генератора, *18*—генератор, *19*—пылеуловитель, *20*—котел-утилизатор, *21*—экономайзер, *22*—гидравлический затвор, *23*—холодильник, *24*—дезинтегратор, *25*—брус—золоудалитель, *26*—неподвижная горизонтальная решетка, *27*—шнек для удаления золы и шлака, *28*—зольный карман

Учитывая, что вследствие большой скорости дутья газом увлекается много топлива, изобретатели предложили вместо улавливания угольной пыли промывкой газа или электрофильтром подавать над слоем топлива нагретый до высокой температуры воздух, газифицирующий взвешенные в газе частицы. Подвод нагретого воздуха вверху способствует также быстрому повышению температуры в генераторе.

По приводимому изобретателями примеру, в генераторе с площадью в 4 $м^2$ при буром угле с 10% влаги в нижней части генератора подводится 4500 $м^3$ воздуха. Для газификации унесенных мелких частиц в верхней части генератора вдувается еще 600 $м^3$ воздуха с температурой 900°. Полученный газ имеет состав: N_2 — 58,8%, CO — 26%, H_2 — 10%, CO_2 — 4,4%, CH_4 — 0,8% и содержит 10 *г* пыли на 1 $м^3$ газа.

Воздух и пар могут подаваться в генератор или под давлением или с помощью всасывания. Последнее имеет то преимущество, что при

этом не требуется замкнутой колосниковой решетки — она может быть открытой и доступной; кроме того в случае взрыва замкнутая камера повреждается, а для открытой взрыв проходит без следа.

Тепло, уносимое газом, может быть использовано для получения пара, нагрева и частичной газификации влажного угля, а также для подогрева вводимых в генератор пара и воздуха.

В установке с использованием физического тепла газа последний при вдувании воздуха имел состав: CO_2 — 5%, CO — 24%, H_2 — 8%, CH_4 — 2% и N_2 — 61%; температура газа составляла 1000° и значительно понижалась в дальнейшем за счет испарения влаги и подогрева топлива, содержащего 55% влаги.

При вводе соответственно подогретых пара и воздуха был получен газ состава: CO_2 — 18%, CO — 21%, H_2 — 40% и N_2 — 21%.

В генераторе с площадью в 12 $м^2$ [149] расстояние между решеткой и выходным отверстием равно 13 *м*. Топливо поступает из угольного бункера к шнеку и из последнего подводится в генератор, в котором высота слоя топлива составляет 1,7 *м* (вообще до 2 *м* и больше). Подаваемое топливо быстро распределяется по сечению генератора. Выделяющиеся из топлив смолы разлагаются.

В верхнюю часть генератора вводится подогретый воздух.

Верхняя часть генератора уширена, что способствует выпадению пыли в генераторе. Из генератора газ поступает в пылеуловитель, в котором выпадают уносимые с газами частицы топлива, возвращаемые в генератор.

Производительность этого генератора составляла 40 000 $м^3$ газа в час с теплотворной способностью в 1050 *кал*/$м^3$.

В установках фирмы «I. G. Farbenindustrie» генераторы Винклера использовались для получения как смешанного, так и водяного газа. Из буроугольного кокса, содержащего 6% влаги и 20% золы, можно было получить в час 6000 $м^3$ водяного и 30 000 $м^3$ воздушного газа без применения перегретого пара.

В генераторах Винклера [150, 151] был с успехом применен непрерывный процесс работы на парокислородном дутье, избавивший от получения воздушного газа. Для целей синтеза аммиака применялось обогащенное кислородом дутье. Сначала применялся буроугольный кокс, а потом мелкозернистый бурый уголь. Получавшийся газ содержал около 10% CO_2, 41% CO, 27% H_2, 21,6% N_2 и только 0,4% CH_4. Он оказался значительно более дешевым, чем газ из буроугольного кокса.

Генераторы Винклера являются особенно пригодными для получения газа, содержащего возможно меньшее количества углеводородов. В производстве аммиака необходима смесь из водорода и азота и нежелательна примесь углеводородов. Последние накапливаются в круговом процессе синтеза и должны быть удалены продувкой, что связано с потерей водорода.

Наличие в генераторах Винклера высокой температуры по всей высоте генератора и отсутствие зоны сухой перегонки обеспечивают распадение углеводородов, в том числе и метана. Количество последнего в газе из генератора Винклера невелико.

В производстве метанола необходима смесь из водорода и окиси

углерода. Здесь примеси азота и углеводородов приводят к загрязнениям циркуляционных газов и являются нежелательным балластом. Путем применения кислородного дутья и непрерывного получения газа может быть избегнуто примешивание азота к продувочным газам.

Конструкция генератора Винклера, служащего для получения силового газа и газа, необходимого для производства аммиака, и водорода, представлена на рис. 116.

В генератор подается предварительно подсушенный мелкозернистый бурый уголь. Загрузка топлива производится шнеком в нижнюю часть слоя топлива. Удаление золы производится вращающимся брусом, охлаждаемым водой и шнеком. Газификация происходит примерно при 1000°. Увлеченные газами частицы подвергаются газификации в верхней части генератора путем подвода дутья. Физическое тепло газов используется в котле-утилизаторе. Из котла-утилизатора газ попадает в водоподогреватель и далее в скруббер, электрофильтр или дезинтегратор Тейсена.

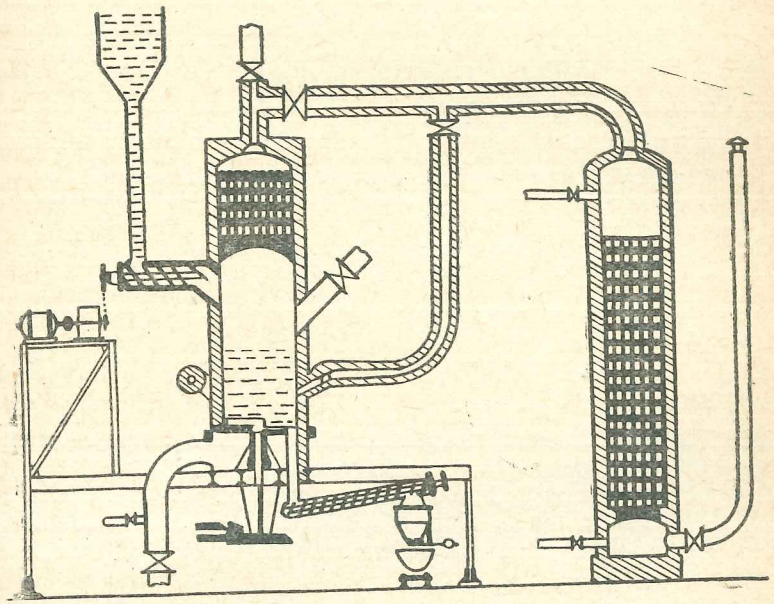


Рис. 117. Генератор Винклера для получения водяного газа периодическим процессом

Путем применения воздушного или паровоздушного дутья можно получить силовой газ; путем применения азотно-кислородной смеси, содержащей 50% кислорода с примесью пара, — азотно-водородную смесь для синтеза аммиака и путем применения парокислородного дутья — почти свободный от содержания азота газ для получения водорода.

При парокислородном дутье состав газа колеблется примерно в следующих пределах; CO_2 — 13—26%, CO — 47—36%, H_2 —

39—41%, CH_4 — 0,4—0,6% и N_2 — 0,4—0,5%. Примерный состав газа при дутье из обогащенного кислородом воздуха и пара: CO_2 — 15,2%, CO — 32,9%, H_2 — 29,7%, CH_4 — 1,3% и N_2 — 20,9%. Расходные коэфициенты на 1 $м^3$ в первом случае: топлива — 0,62 *кг*, воздуха — 0 $м^3$, 98%-ного кислорода — 0,27 $м^3$, пара — 0,3 *кг*, во втором — соответственно — 0,5 *кг*, 0,23 $м^3$, 0,17 $м^3$ и 0,2 *кг*.

При площади генератора в 24 $м^2$ производительность его составляет 75 000 $м^3$/*час* (12 000—115 000). К. п. д. 64—71%.

В генераторе Винклера получение водяного газа периодическим путем основано на следующих принципах.

Генератор (рис. 117) снабжается насадкой, аккумулирующей тепло. Воздух в период воздушного дутья производит лишь незначительное движение слоя топлива. Большое количество воздуха вдувается в верхней части генератора с небольшой скоростью и направляется на слой топлива. Получаемый газ содержит 16—18% углекислоты. Температура слоя в течение 5 мин. повышается до 1100°. Тепло получаемого газа используется для нагрева насадки вверху генератора и каупера. В период парового дутья, которое производится только сверху вниз, в каупер вдувается перегретый пар, и в это же время в генератор загружается шнеком уголь. Попадая в раскаленный слой, уголь быстро подвергается сухой перегонке, образующиеся газы примешиваются к водяному газу.

Удаление шлаков производится шнеком.

В СССР опыты по газификации различных топлив в генераторе типа Винклера производились Институтом азота (ГИА).

Для опытов служила шахта высотой 11 *м*, с нижней частью высотой 1,2 *м* и диаметром 0,9 *м* и верхней частью диаметром 1,4 и 2,4 *м*. Горизонтальная решетка имела конические отверстия диаметром вверху 4 и внизу 8 *мм* и живое сечение около 4% (в обычных вращающихся решетках 5—25% от сечения генератора). Удаление шлака с решетки производилось брусом с водяным охлаждением. Унос не возвращался в генератор. Топливо дробилось и подавалось шнеками на высоте 1,7 *м*. Подмосковный уголь подсушивался. Вторичное дутье подавалось на высоте 4 *м* через охлаждаемые водой фурмы. Производительность установки лимитировалась наличием кислорода.

Основным затруднением при газификации подмосковных и лисичанских углей явилось шлакование (образование сводов).

Борьба со шлакованием велась путем понижения температуры в зоне газификации до 850—950° при температуре газа около 1000° и обогащением угля для удаления колчедана. При слое более 1,2—1,5 *м* качество газа ухудшалось и в слое наблюдалась пульсация.

При газификации обогащенного подмосковного угля с W — 10,5%, A — 25,6%, размером кусков 0—10 *мм*, содержании 59,8% O_2 в дутье, расходе дутья 0,61 $м^3$/*кг* и добавке пара 0,39 *кг*/*кг* получался газ следующего состава: CO_2 — 26,80%; H_2S — 0,80%; O_2 — 0,10%; CO — 29,35%; H_2 — 30,0%; CH_4 — 0,15%; N_2 — 18,8%; $Q_н$ — 1753 *кал*/$м^3$. Выход сухого газа составлял 1,37 $м^3$/*кг*, влажность газа — 318 *г*/$м^3$, температура газа — 1060°. Содержание углерода в

провале составляло 6,3% и в уносе — 28,9%; количество уноса — 117 *г*/$м^3$ влажного газа. Разложение водяного пара составляло 23%.

Количество дутья составляло 925 $м^3$/*час*, в том числе 15—18% подавалось в верхнюю часть шахты, что соответствует напряжению дутья по решетке в 1250 $м^3/м^2$ *час*. Расходные статьи теплового баланса: теплотворная способность газа — 60,5%, теплосодержание газа — 18,9%, потеря в провале и уносе — 16,45%, потеря в окружающую среду — 4,15%.

Показатели по лисичанскому углю были аналогичны.

Исследование процессов, протекающих в верхней части шахты, показало значительное уменьшение содержания CO_2 и увеличение содержания CO и некоторое уменьшение или неизменность содержания H_2 после ввода вторичного дутья. В дальнейшем содержание CO_2 и H_2 немного росло, а CO уменьшалось. Это может быть объяснено продолжающимся разложением водяного пара и протеканием реакции:

$$CO + H_2O = CO_2 + H_2.$$

Температура в свободной части генератора была выше, чем в слое топлива.

Несмотря на большое тепловое напряжение в слое топлива, количество потенциального тепла в газе, получаемом в слое топлива, составляет только 30—40% от общего. При одном из опытов в слое топлива в CO_2 переходило 55% C и в CO — 45%, а за счет вторичного дутья в CO_2 — 25% и в CO — 75%.

Генератор ВНИГИ [1]

Генератор ВНИГИ (ч. II, рис. 39) состоит из высокой сужающейся внизу шахты. Мелкое топливо подается сверху навстречу газам. В нижней конической части устанавливается взвешенное состояние газифицирующихся частиц. Крупные частицы топлива выпадают на решетку с мелкими отверстиями, где выгорают в интенсивном токе газов. Мелкие частицы и зола уносятся газами, улавливаются в пылеуловителе и возвращаются в генератор. Зола и шлак удаляются с решетки специальным механизмом.

Топливо подается шнеком в коробку, снабженную тарелками и гребками и расположенную внутри генератора. Топливо пересыпается гребками по тарелкам и подсушивается за счет тепла отходящих газов.

Полупромышленная установка дает на фрезерном торфе интенсивность газификации, равную 1300 *кг*/$м^2$ *час*. Газ получается бессмольный с $Q_н$ — 1200 *кал*/$м^3$.

Подземная газификация углей

Одним из новейших методов газификации топлива, реализуемым в СССР, является подземная газификация.

---

[1] Всесоюзного научно-исследовательского газового института (авторы: Куринов И. Х., Красный А. Я., Михеев А. И., Шашкин С. А.).

Подземная газификация заключается в превращении в газ топлива на месте его залегания, т. е. без предварительных дробления, выдачи на поверхность земли и проведения ряда обычных операций по подготовке.

Этот способ получения газа сулит значительные выгоды в силу возможности избежать дорогостоящих добычи, сортировки и транспорта топлива и создать центральные базы по снабжению районов газовым топливом, химическим сырьем и энергией (газовые турбины), а также ввиду увеличения топливных ресурсов страны вследствие возможности газификации «нерабочих» — нерентабельных для обычной выработки пластов.

Важность и возможность решения проблемы подземной газификации отмечались еще Д. И. Менделеевым (1888 г. и позже) и В. Рамсэем (1910—1915 гг.). Последним были даже разработаны схемы опытных установок и построена опытная станция.

В. И. Ленин придавал исключительное значение проблеме подземной газификации углей. Еще в 1913 г. он писал в «Правде»[1].

«Способ Рамсэя превращает каменноугольные рудники как бы в громадные дестилляционные аппараты для выработки газа. Газ приводит в движение газовые моторы, которые дают возможность использовать вдвое бо́льшую долю энергии, заключающейся в каменном угле, чем это было при паровых машинах. Газовые моторы, в свою очередь, служат для превращения энергии в электричество, которое техника уже теперь умеет передавать на громадные расстояния».

«Переворот в промышленности, вызванный этим открытием, будет огромен».

В начале 1930 г. группа политработников 78-го кавалерийского полка РККА, ознакомившись со статьей В. И. Ленина о подземной газификации, обратилась с письмом в ЦК ВКП(б) к товарищу Сталину и в Комитет по химизации при СНК СССР к тов. Куйбышеву с просьбой выяснить судьбу предложений о подземной газификации углей и приступить к проведению опытов. Одновременно группа научных работников Московского горного института обратилась в ЦК ВКП(б) с предложением организовать экспериментальную работу. По предложению товарища Сталина была организована Комиссия по подземной газификации углей. Экспериментальные работы были начаты в 1933 г. конторой «Подземгаз».

Все описанные выше приспособления для газификации углей свидетельствуют о наличии весьма серьезных проблем в вопросе подземной газификации, заключающихся в подготовке самого пласта, организации подачи дутья, разжигания целика, ведении самого процесса газификации и его контроля и т. д. Очевидно, что газификация в пластах имеет специфические особенности, связанные с особенностями залегания пластов: их мощностью, глубиной расположения, углом падения, свойствами кровли и почвы, наличием подземных вод и т. д.

[1] В. И. Ленин, Собр. соч., изд. II, т. XVI, стр. 368–369.

Методы подземной газификации [1]

Методы подземной газификации в основном можно разбить на две группы: 1) методы, связанные с раздроблением угля, и 2) методы газификации угля в целике.

Методы, связанные с раздроблением угля, в основном копируют метод газификации в обычных генераторах. Они предусматривают проведение сложных и капитальных работ для подготовки пласта и управления процессами, а именно: проходки шахт и штреков, частое бурение, заполнение бурок взрывчатыми веществами. Такие методы подземной газификации называют шахтными.

При шахтном методе газифицируемый участок угля отделяется от соседних перемычками. На рис. 118а, представлена схема газификации с дроблением угля. Вверху и внизу целика угля проходятся по простиранию угля штреки *1*, *3*, из которых верхний служит для отвода газов через окна в изолирующем слое, и нижний — для подвода дутья через такие же окна. Трубы *2* для дутья проводятся через специальную шахту *4*. Газы выводятся на поверхность с помощью огневой шахты *6*.

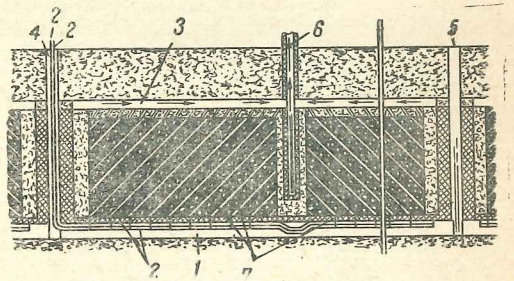


Рис. 118а. Метод газификации с проходкой скважин в пласте угля и шахт:

1—коренной штрек, *2*—трубопроводы для воздуха и пара, *3*—огневой штрек, *4*—подъемная шахта, *5*—вентиляционная шахта, *6*—огневая шахта, *7*—скважины

Для разжига в пласте угля проходится снизу вверх выработка. Через каждые 2,5 *м* пласт пробуривается бурками *7*, заполняемыми взрывчатым веществом, взрывающимся самостоятельно по мере приближения зоны высоких температур или с помощью электрических запалов. Прохождение дутья именно через слой угля, а не через полость, образовавшуюся в результате выгорания угля, достигается благодаря самостоятельному обрушению кровли или закупориванию полостей специально подаваемым глинистым раствором.

Один из подобных методов (магазинирования) предусматривает даже ручные выемку и дробление угля, закладку и изоляцию газифицируемого участка от других перемычками.

Методы подземной газификации, связанные с дроблением угля, требуют значительных горных работ, дорогих и сложных. Кроме того, как выявилось при испытаниях (см. ниже), эти методы не обеспечивают достижения устойчивого и управляемого режима. При взрывах уголь дробится на куски неодинаковых размеров (глыбы и пыль) и вскоре после разжига вследствие неравномерного прохода дутья наблюдаются прогары, проскоки воздуха, сжигающего газ, и местные затухания. В результате получается газ неудовле-

[1] Излагается главным образом на основе работ «Подземгаза».

творительного качества. При испытаниях также наблюдалась не-
плотность стен, отделяющих целик, что обусловливало утечку газа
и дутья, или (при разрежении, создаваемом эксгаустером) подсос
воздуха к отводимому газу.

Газификация топлива в целике основана на взаимодействии
потока газов с углеродом при протекании их вдоль сплошной
поверхности нераздробленного угля. Подобные методы, если они
не требуют значительных горных работ и проходки шахт, назы-
ваются бесшахтными.

К числу методов, допускающих бесшахтное осуществление, в
первую очередь следует отнести метод Донецкого углехимического
института (ДУХИ), разработанный под руководством П. В. Скафа,
В. А. Матвеева и Д. И. Филиппова; на основе этого метода впо-
следствии были сделаны и другие предложения.

По методу ДУХИ (метод потока) процесс газификации целика
ведется без предварительной подготовки его (дробления и т. п.).



Рис. 118б. Метод газификации ДУХИ (метод потока):
1 и *2*—наклонные штреки, *3*—горизонтальный штрек

Дутье подается в канал внизу панели, пройденный в целике угля в направлении его простирания. В этом канале происходит взаимодействие газов с топливом и получение генераторного газа.

На рис. 118б представлена схема газификации по методу ДУХИ. По падению пласта проходятся две параллельные наклонные выработки *1* и *2*. По простиранию пласта эти выработки соединяются штреком *3*. Газификация происходит в штреке — канале *3*, дутье подается каналом *1*, а получившиеся газы отводятся каналом *2*. Выгорание пласта идет по восстанию его. Обрушающаяся кровля и шлаки при выгорании пласта падают вниз, оставляя поверхность угля доступной воздействию дутья.

Две описанные панели могут быть соединены в одну с оставлением общей средней выработки для отвода газов (Ш-образная форма).

Процесс газификации по этой схеме может быть реверсивным, т. е. возможно взаимно заменять подачу дутья и отвод газов, что содействует равномерному выгоранию пласта по простиранию.

При бесшахтном осуществлении этой схемы с поверхности земли на пласт угля проходится серия скважин, которые соединяются по падению пласта двумя наклонными параллельными выработками. Расстояние между скважинами составляет в зависимости от мощности пласта и геологических условий залегания 100—200 *м*.

Для проходки горизонтальной выработки при бесшахтном осуществлении (сбойка скважин) с поверхности земли предложен метод гидравлической сбойки; возможно использование и метода прожига.

Метод гидравлической сбойки скважин заключается в прохождении горизонтальных подземных выработок с поверхности (без подземного труда человека). В вертикальную скважину, пробуренную несколько глубже того уровня, на котором должна быть пройдена горизонтальная выработка, опускается труба с соплом на нижнем конце ее; соплу дается то направление, в котором необходима проходка горизонтальной выработки. В ту же скважину, но глубже (как бы в зумпф), опускается другая труба, с обратным

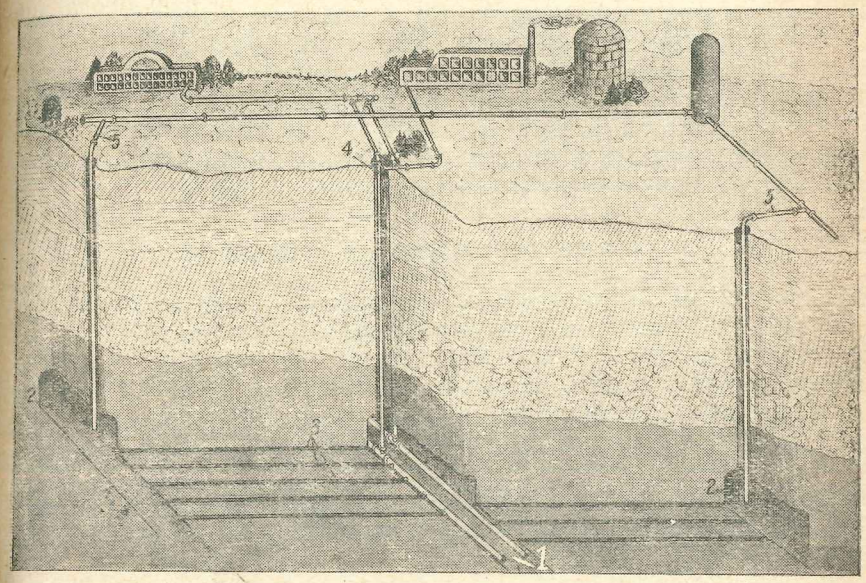


Рис. 118в. Метод скважин—газогенераторов:
1—средний штрек, *2*—крайние штреки, *3*—скважины, *4*—подвод дутья, *5*—отвод газа

клапаном (служащая для откачки воды и шлама). Вверху скважина герметически закрывается и к соплу нагнетается под давлением вода, размывающая уголь в заданном направлении; вода и шлам откачиваются (по трубе с обратным клапаном) по принципу сифона или по принципу аэролифта.

Описанный метод газификации проверен на наклонно залегающих пластах и принят для эксплоатации.

К числу методов газификации в целике относится также метод скважин — газогенераторов, предложенный Тоном и Кириченко и являющийся видоизменением метода потока; необходимость его применения возникает при газификации пластов угля с слабой кровлей, залегающих горизонтально, где обрушение кровли над выгоревшей зоной может создать неплотность в подземном газоге-

нераторе и нарушить процесс газификации угля в целике и где поэтому условия для применения метода потока неблагоприятны.

По методу скважин — газогенераторов (рис. 118в) по пласту проходят три параллельные выработки (штреки *1*, *2*) на расстоянии 100 *м* и больше друг от друга. Они соединяются между собой скважинами *3*, диаметром 100—150 *мм*, пройденными из среднего штрека в самом низу пласта. Ко всем трем штрекам у их начала с поверхности земли проходят вертикальные скважины, служащие в среднем штреке для подвода дутья и в крайних штреках для отвода газов.

Штреки крепятся огнеупорным креплением и отделяются от остальных выработок перемычками. Уголь разжигается проволоками, раскаленными электрическим током при подаче кислорода. Газификация идет в скважинах, постепенно увеличивающихся в размере. При разгаре скважин до кровли происходит ее обрушение, и процесс газификации переносится на следующую скважину.

Метод скважин проверен на опыте и в настоящее время рационализируется для промышленного применения в тех случаях, когда метод ДУХИ может встретить затруднения.

Данные о проведенных опытах

В опытах на Крутовском месторождении Подмосковного бассейна (1932 г.) пытались продувать целик, раздавленный кровлей. Эти опыты не дали удовлетворительных результатов в смысле получения горючего газа и овладения процессом главным образом вследствие недостаточного уплотнения выделенного участка.

В остальных опытах подземной газификации, относящихся к первоначальному периоду, предусматривалось создание условий, соответствующих работе обычных газогенераторов.

Проф. Федоровым В. П. предложена схема, по которой по двум крайним штрекам подводится дутье, а по среднему штреку отводятся газы. Из крайних штреков к центральному проходятся скважины, в которые закладывается взрывчатое вещество. Опыт не увенчался успехом.

При опыте на Шахтинском участке предполагалось использовать пласт с мощностью в 0,4 *м* с малой водоносностью и с углом падения в 20°. Установка была выполнена по методу инж. А. С. Кузнецова. Панель была герметизирована и процесс хорошо контролировался контрольно-измерительной аппаратурой. Установка была снабжена вентиляторами для подачи воздуха и отвода газов. Опыты проводились с предварительным раздроблением антрацита в месте залегания (метод магазинирования). Результаты опытов были неудовлетворительны: процесс шел неустойчиво и получение генераторного газа наблюдалось только в течение коротких промежутков времени. При опыте, продолжавшемся 1½ месяца (1934 г.), состав газа колебался в следующих пределах: CO_2 — 6—14%; O_2 — 0—1,2%; CO — 13—23%; CH_4 — 0,1—0,6%; H_2 — 7—12%; N_2 — 66—67%. При другом опыте, продолжавшемся две недели, были следующие колебания состава газа: CO_2 — 13—17%; O_2 — 0—0,4%; CO — 12—22%; CH_4 — 0,6—1,8%; H_2 — 19—23%; N_2 — 46—65%.

Интересно отметить высокое содержание в газе водорода, которое при сухом дутье может быть обусловлено отчасти разложением влаги пласта, отчасти сухой перегонкой антрацита.

В середине 1934 г. были проведены опыты подземной газификации по способу Кириченко в Лисичанском районе на Бобровском пласте мощностью 0,7 *м* и с углом падения в 45°. Экспериментальная панель была изолирована пустой породой и каменной стеной. После разжига получить намечавшимся путем горючий газ не удалось; он был получен только через скважины, пробуренные с поверхности пласта для контроля. Состав газа был следующий: CO_2 — 12—18%; O_2 — 0,7—0,9%; CO — 9—12%; CH_4 — 2—3%; C_mH_n — 0,05—0,15%; H_2 — 13,8—20,6%; N_2 — 48—58%.

Панель (рис. 118а) оказалась очень громоздкой и воздействовать на ход процесса было трудно.

По причинам, указанным при оценке метода газификации с предварительным дроблением угля, он успеха не имел.

Во всех опытах при выключении подачи дутья наблюдалось выделение газа с высоким содержанием водорода.

Безуспешным оказался и опыт применения трудоемкого магазинированного метода газификации.

Дальнейшие исследования подземной газификации целиков велись методом потока и методом скважин — газогенераторов.

В апреле 1934 г. работниками Донецкого углехимического института были проведены опыты на Лисичанской станции по газификации Бобровского пласта на кислородном дутье. К пласту были проведены трубопроводы для подачи дутья и отвода газа и были устроены запальные сооружения, после чего доступ к пласту был герметизирован. Кислород подавался по трубопроводу с поверхности. Давление дутья у входа в очаг газификации доводилось до 7 *ат*. Примерный состав газа был следующий: CO_2 — 12,7%; O_2 — 0,9%; C_mH_n — 0,15%; CO — 51,6%; H_2 — 28,0%; CH_4 — 0,3%. Опыт продолжался более трех часов и был остановлен вследствие аварии газоотводной трубы. При опыте по методу скважин — газогенераторов, проведенном на Лисичанской станции и продолжавшемся около четырех суток, по восстанию пласта была пробурена скважина диаметром 75 *мм* и в нее подавалось воздушное дутье из компрессоров. Скважина была зажжена с помощью кислорода. Состав газа колебался в следующих пределах: CO_2 — 11,6—13,5%; O_2 — 0,2—0,8%; CO — 6,6—12,7%; H_2 — 3,9—9,0%; CH_4 — 1,0—2,5%; C_mH_n — 0,1—0,5%; N_2 — 65—73%. В последние двое суток количество подававшегося дутья составляло 380 *м³/час*. Скважина была остановлена вследствие прогара.

В 1934 г. были также проведены опыты по газификации угля Журинского пласта Ленинского района мощностью в 5 *м* с углом падения в 2° (остатка, с трех сторон окруженного старыми выработками, с четвертой — сбросом, за которым простиралась безугольная свита). Опыт проводился без предварительного разрыхления пласта. По угольному пласту был пройден штрек, связанный с по-

верхностью двумя шурфами для подачи воздуха и отсоса газа. На первом шурфе был установлен вентилятор производительностью в 3000 *м³/час*, а у вытяжного шурфа — выхлопная труба. Панель была зажжена через ниши кострами. Разжиг шел медленно ввиду недостаточности дутья. Почти целый месяц газ по составу соответствовал дымовому, после чего, очевидно вследствие хорошего разгара целика и обрушения пласта, состав газа улучшился. Устойчивый режим установился лишь через два месяца с начала разжига. Средний состав газа был следующий: CO_2 — 12,5%, CH_4 — 25,0%; H_2 — 32,0%; CO — 7,5% N_2 — 23,0%. Состав газа свидетельствует о проходившем в пласте процессе сухой перегонки. Периодически, вследствие прогаров, получались продукты горения. Процесс оказался неуправляемым.

Метод скважин — газогенераторов был реализован в январе 1935 г. на Крутовской шахте Подмосковного бассейна на пласте мощностью 1,6 *м* при горизонтальном залегании на глубине 18—20 *м*. Состав топлива был следующий: W^p — 40,09%; A^p — 9,14%; S^p — 2,63%; C^p — 34,26%; H^p — 2,09%; $(O + N)^p$ — 13,15%; $Q_н$ — 3118 *кал/кг*. Огневой и газосборный штреки соединялись шестью скважинами диаметром 100 *мм* и длиной 12 *м*. Воздух подавался под давлением 600 *мм* вод. ст. Исследовалось два режима: непрерывный воздушный и попеременный воздушный и паровоздушный. Состав воздушного газа: CO_2 — 16—18%; CO — 1,5—3,0%; H_2 — 3—5%; CH_4 — 1,5—2,5%; $Q_н$ — 400—500 *кал/м³*. Состав газа при паровоздушном дутье: CO_2 — 30—37%; CO — 4—7%; H_2 — 16—24%; CH_4 — 2,5—3,0%; $Q_н$ — 900 *кал/м³*.

Плохое качество газа может быть объяснено низкой температурой в зоне газификации вследствие высокой влажности топлива.

При четвертом опыте, лучше оформленном, при переменной подаче воздуха и пара состав газов воздушного дутья был следующий: CO_2 — 18—20%; CO — 1—4%; H_2 — 7—10%; CH_4 — 1%; $Q_н$ — 380 *кал/м³*.

Состав газа при паровом дутье: CO_2 — 25—30%; CO — 13—18%; H_2 — 30—40%; CH_4 — 1,5—2,5%; $Q_н$ — 1550 *кал/м³*.

Опыты протекали в неблагоприятных условиях — недостаточной мощности дутьевых ресурсов, обводнении пласта и др. Все же процесс был управляемым и состав газа устойчивым.

В 1935 г. в Лисичанске были проведены опыты подземной газификации с раздельной подачей дутья в отдельные скважины. Опыты проводились на малой панели. От воздухопровода к отдельным скважинам были сделаны ответвления, снабженные вентилями. Количество воздуха, подаваемого в каждое ответвление, замерялось. Газ из скважин собирался в газовом коллекторе. При подаче в панель воздуха в количестве 900—1000 *м³/час* получался газ с теплотворной способностью 800—1200 *кал/м³*, содержавший: CO_2 — 9%; CO — 15%; H_2 — 12%; CH_4 — 3%. Количество получавшегося газа составляло 1300—1700 *м³/час*. Давление дутья составляло около 400 *мм* вод. ст. При уменьшении количества подаваемого воздуха до 200—300 *м³/час* содержание CO в газе резко снижалось (до 3—4%); содержание CO_2 резко увеличивалось, содержание H_2

вначале повышалось до 15—18%, а затем снижалось до 5—7%. С понижением содержания в газе H_2 увеличивалось содержание CH_4. При работе на естественной тяге резко увеличивалось содержание CO_2 (до 50% и выше) и H_2 (до 35%) при одновременном снижении содержания CO до 1,0—1,5%; содержание CH_4 колебалось в пределах 2—5%.

Исследователями высказано предположение, что при самостоятельном вводе дутья в отдельные скважины имеется возможность управлять процессом, что невозможно при вводе дутья в общий коллектор. Разница в сопротивлении отдельных скважин увеличивается по мере их разгара и вынуждает в случае подвода воздуха в общий коллектор останавливать процесс, что связано с большой потерей угля.

В 1935 г. в Лисичанской шахте были также проведены опыты получения водяного газа по методу скважин — газогенераторов.

Опытная панель (№ 4) состояла из трех действующих скважин — газогенераторов, 25 *м* длиной и 100 *мм* диаметром каждая, пробуренных по восстанию угольного пласта на расстоянии 2,5 *м* одна от другой. Воздушное дутье подводилось в панель снизу. Кроме того в панель подавался сверху и снизу пар. Опыты проводились с чистовоздушным дутьем и с переменным воздушным и паровым дутьем. При воздушном дутье получался газ примерно следующего состава: CO_2 — 11,0%; CO — 12,0%; CH_4 — 2,5%; H_2 — 14%; N_2 — 60,5%. Процесс протекал устойчиво и был управляемым.

При переменном воздушном и паровом дутье получался газ следующего состава: при воздушном дутье CO_2 — 17,0%; CO — 4,6%; H_2 — 10,2%; CH_4 — 0%; N_2 — 68,2% и при паровом: CO_2 — 21,0%; CO — 15,0%; H_2 — 51,5%; CH_4 — 6,2%; N_2 — 6,3% с теплотворной способностью 2075 *кал/м³*. Процесс был управляемым.

Схема подземной газификации по методу ДУХИ была осуществлена в 1935 г. в Горловском районе Донбасса. Был использован пласт мощностью около 2 *м*, круто падающий с углом падения 78°. Состав лабораторной пробы топлива был следующий: C — 59,9%; H — 2,24%; O — 2,3%; N — 1,7%; S — 3,1%; *A* — 29,9%; *W* — 1,6%; V^a — 18,62%.

Длина участка по простиранию составляла 100 *м*. С поверхности земли на глубину 50 *м* были пройдены два шурфа и гезенки длиной 30 *м* для подачи дутья с давлением в 3,5 *ат* и отвода газов. Для контроля процесса с поверхности были пройдены три скважины.

При работе на коротком огневом забое (вследствие аварии одного шурфа) с производительностью 11 *т/сутки*, при дутье с содержанием 27% кислорода получался газ примерно следующего состава: CO_2 — 7,9%; CO — 18,4%; H_2 — 17,6%; CH_4 — 4,6%; N_2 — 51,5%. $Q_н$ — 1400 *кал/м³*. При работе на самотяге в период прекращения подачи дутья получался газ следующего состава: CO_2 — 13,6%; CO — 6,3%; H_2 — 58,5%; CH_4 — 4,3%; N_2 — 17,1%. С прекращением дутья возрастало содержание H_2 и CO_2 и уменьшалось содержание остальных составных частей газа.

Приведенные данные позволяют заключить, что в период малой подачи дутья, а также в период работы на самотяге получаемый газ в значительной мере состоит из продуктов сухой перегонки. Дальнейшие опыты дали возможность констатировать, что при увеличении концентрации кислорода в дутье до 30—35% и производительности примерно в 15 *т/сутки* в период дутья получается газ с теплотворной способностью до 1350 *кал/м*³ и в периоды выключения дутья — с более высокой теплотворной способностью (технологический газ). Выход газа составил 2,8 *м*³/*кг*, потери газа — 2,3%.

Интересно отметить, что повышение давления дутья в подземном генераторе происходило очень медленно (10—12 час.) и так же медленно спадало при выключении дутья.

По данным одной из контрольных скважин интенсивность газификации, отнесенная к 1 *м*² поверхности условного огневого забоя, составляет 20—60 *кг* в час в зависимости от состава и интенсивности дутья.

Как указывает В. А. Матвеев, получение в период отсутствия дутья газа с высоким содержанием H_2 и CO_2 объясняется образованием водяного газа за счет притока грунтовых вод и крекированием выделяющихся продуктов сухой перегонки. Примесь азота зависит от состава газов дутьевого периода.

В начале 1936 г. метод ДУХИ проверялся также в Лисичанске на Бобровском пласте с углом падения в 40° (панель № 5). Скважина имела начальный диаметр 100 *мм* и длину 20 *м*. Была предусмотрена возможность реверсивности дутья. Количество дутья составляло 2000—2200 *м*³/*час* при давлении в 2—3 *ата*. Пар подавался в количестве 2500 *кг/час* с давлением в 4—5 *ата*. Разжиг производился с помощью кислорода и электрического тока.

Длительность фазы воздушного дутья составляла 15 мин. и парового — 13 мин. В течение двух суток состав газа воздушного дутья (подача воздуха 2050 *м*³/*час*) был следующий: CO_2 — 14—16%; CO — 0,4—4,0%; H_2 — 7,2—11,9%; CH_4 — 0,8—1,6% и N_2 — 68,1—77,1%, температура газа 278—588°; состав водяного газа: CO_2 — 14—23%; CO — 11,8—25,4%; H_2 — 34,6—52,4%; CH_4 — 1,1—5,2%; N_2 — 7,8—25,0%. При уменьшении продолжительности воздушной фазы качество газа ухудшалось.

При уменьшении расхода дутья теплотворная способность газа воздушного дутья уменьшалась, повидимому вследствие понижения температуры.

К концу паровой фазы содержание в газе H_2 увеличивалось, а N_2 — снижалось.

Пущенная в 1935 г. в Кузнецке панель отличалась от Горловской тем, что в ней предусматривалось два хода для подачи дутья и три для отвода газа. Воздухопровод был сделан секционным. При продвижении огневого забоя часть воздухопровода сгорала и создавался проход для дутья.

Как и в первом случае, первоначально шел преимущественно топочный процесс, и получаемые газы представляли собою смесь продуктов горения и газов сухой перегонки. Через месяц с лишним установился примерно следующий состав газа: CO_2 — 12—13%; O_2 — 0,2—0,3%; CO — 11—14%; H_2 — 15—16,5%; CH_4 — 4—4,5%; N_2 — 54—56%; $Q_н$ — 1096—1189 *кал/м*³. Количество подаваемого воздуха составляло до 2000 *м*³/*час* и получаемого газа — до 2500 *м*³/*час*.

В дальнейшем, при работе на периодическом режиме состав газа бездутьевого периода был следующим: CO_2 — 24—28%; O_2 — 0,2—0,3%; CO — 4,8%; H_2 — 28—45%; CH_4 — 5—9%; N_2 — 17—33%; $Q_н$ — 1473—2215 *кал/м*³. Наблюдалась большая потеря газа вследствие неглубокого залегания угля (28 *м*), нарушения кровли (осадка и трещины) и соединения генераторов с выработанным пространством шахты. Процесс оказался управляемым.

Таким образом в Горловке, Кузнецке и Лисичанске была доказана возможность получения горючего газа в целике угля как непрерывным, так и периодическим процессом.

В настоящее время подземная газификация вступила в стадию промышленного освоения.

☆

Глава третья

ПОДАЧА ГАЗА

☆

1. ГАЗОПРОВОДЫ И ТРАНСПОРТ ГАЗА

Газ отводится из генераторов и подводится к местам потребления газопроводами. При получении воздушного или смешанного газа он может быть направлен к потребителю или без предварительной мокрой очистки или после таковой.

В случае отсутствия мокрой очистки газ из генератора попадает обычно непосредственно или через сухой пылеуловитель в общий газосборник-коллектор и из последнего к потребителю. В коллекторе газ перемешивается, и его состав выравнивается, благодаря чему уменьшается влияние периодичности загрузок, шуровок и чистки отдельных генераторов на работу потребителей газа.

При наличии мокрой очистки газ поступает в очистные приспособления из коллектора, или же каждый генератор снабжается самостоятельными очистными приспособлениями, и газ от всех генераторов собирается только после очистки.

В установках водяного газа каждый генератор обычно снабжается индивидуальными газопроводами и аппаратами очистки; продукты горячего дутья выпускаются в атмосферу, а водяной газ от всех генераторов собирается после очистки.

Размеры и конструкция газопроводов зависят от ряда причин, в частности от свойств и количества газа, дальности проводки, стоимости материалов и электроэнергии.

Газопровод должен быть прочен, плотен, достаточно доступен для обслуживания и контроля, и стоимость транспорта газа должна быть невелика. К материалу газопровода предъявляется требование стойкости в отношении разъедающего действия газов и паров, движущихся по газопроводу, и конденсата, выделяющегося в нем.

Если газ горячий и загрязнен (пылью, сажей, смолой), то к газопроводу могут предъявляться требования удобства чистки, максимального освобождения газа от взвешенных частиц, хорошей изоляции для уменьшения потерь тепла, малого сопротивления движению газа и т. д. Ко всем газопроводам во всяком случае предъявляется требование надежности и максимальной бесперебойности работы.

С газопроводами неразрывно связаны пылеуловители, так как взвешенные в газе частицы выпадают из газа на пути его движения, особенно при наличии изменений скорости и направления движения.

Газопроводы делаются кирпичные и металлические.

Кирпичные газопроводы

Кирпичные газопроводы часто делают подземными, прямоугольного сечения, со сводом, очерченным по дуге круга, обычно радиуса, равного ширине канала (60°), а иногда и меньшего. При высокой температуре газа, а также при холодном, но неочищенном газе для большей прочности при чистке и выжигании кирпичные газопроводы изнутри футеруют огнеупорным кирпичом, а снаружи выкладывают из красного кирпича (рис. 119 и 120).

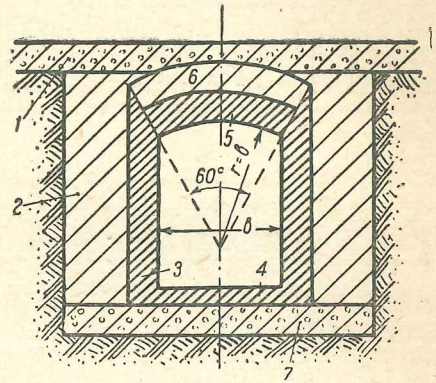


Рис. 119. Подземный газопровод:
1—бетонная выстилка (пол здания), *2*—внешняя кладка из красного кирпича, *3*—огнеупорная кладка стен (½ кирпича), *4*—выстилка пода, *5*—арка свода из огнеупорного кирпича, *6*—арка свода из красного кирпича, *7*—бетонное основание, *в*—ширина канала, *r*—радиус дуги свода

Если газопроводы находятся в земле, их не обвязывают, так как распор свода воспринимается землей; если же кирпичные газопроводы делают надземными, то их обвязывают металлическими связями и вдоль пят сводов прокладывают железные угольники, или швеллера. На пути движения газов, особенно у поворотов, в газопроводах устраивают мешки для осаждения смолы и пыли.

Кирпичные каналы более дешевы, чем железные, и кроме того при устройстве под землей они не препятствуют проходу или проезду. Потеря тепла в кирпичных газопроводах незначительная (табл. 63) [119].

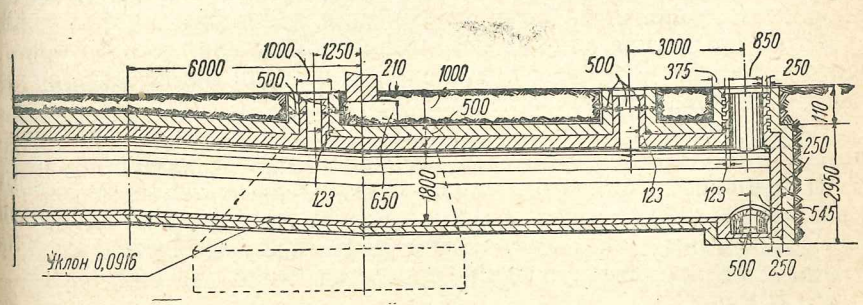


Рис. 120. Подземный газопровод

Недостатками кирпичных подземных каналов являются: затруднительность чистки, меньшая доступность для осмотра, а также легкость проникновения в них грунтовых вод.

Кирпичных газопроводов не применяют в следующих случаях:
1) при прохождении газов под большим давлением;

2) при пользовании бессмольным (антрацитовым, коксовым) или очищенным газом, так как в этом случае имеющиеся трещины не закупориваются смолой [1];

Таблица 63

Падение температуры газа в подземном хорошо изолированном канале

Температура газа (в °С)	Падение температ. на 1 *пог. м* (в °С)	Длина канала (в *м*), при которой температура газа падает на 100°
700—600	3,5	28
600—500	3,0	33
500—400	2,5	40
400—300	2,0	50
300—200	1,0	100

3) при применении надземных газопроводов, могущих оказаться под разрежением, так как в этом случае в газопровод может присосаться воздух [2].

Кирпичные подземные газопроводы должны располагаться выше уровня грунтовых вод и быть достаточно прочными.

Металлические газопроводы

Металлические газопроводы делаются большею частью надземными подвесными и свободно располагаются на специальных железных сварных или бетонных стойках таким образом, чтобы они могли передвигаться при изменениях температур. Кожухи надземных газопроводов делаются сварными из листового железа в 6 *мм* и больше. Сварка предпочтительно газовая, обеспечивающая большую прочность и плотность шва. Соединения выполняются фланцевые, свободно вращающиеся, под отбортовку; уплотнения для труб большого диаметра производятся асбестовым шнуром и для малого диаметра (300 *мм* и ниже) — асбестовым картоном.

Газопроводы в случае высокой температуры газа футеруются внутри фасонным огнеупорным кирпичом: при больших диаметрах в $^1/_2$ и при меньших в $^1/_4$ кирпича. При низкой температуре газа газопроводы не футеруются. Металлические газопроводы значительно более доступны для осмотра, чем кирпичные, и чистка их более легка. Форма газопроводам придается круглая или овальная (рис. 121).

Охлаждение газа в железных газопроводах более сильное, чем в кирпичных [119] (табл. 64). Иногда при влажном газе пользуются конденсирующим действием газопровода, устраивая длинные железные газопроводы, в которых газ сильно охлаждается, вследствие чего из него выделяется часть влаги. Для уменьшения потери тепла газопроводами при прохождении по ним горячего газа их изолируют, для чего между огнеупорной футеровкой и листовым железом выкладывают слой изоляционного кирпича (рис. 121). Различают стойки, создающие мертвую опору газопровода и позволяющие ему перемещаться. В первом случае стойки разбивают газопровод на участки компенсирования, воспринимающие усилия, возникающие от ветра, изменения температуры газопровода и т. д. Подобные стойки могут выполняться в виде пространственных ферм. Они применяются и в случае расположения на них подвижных опор (например катков), допускающих передвижение газопровода. Возможна замена этих стоек подвижными (более легкими) стойками, допускающими передвижение газопровода. Эти стойки — более легкие — могут выполняться в виде плоских металлических ферм.

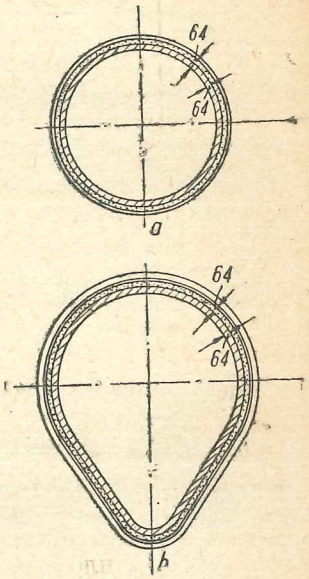


Рис. 121. Профили газопроводов:
a—круглый, *b*—овальный

Для облегчения обслуживания клапанов, задвижек и компенсаторов на стойках предусматривают площадки.

Падение температуры газа в газопроводе и температура внутренней поверхности стенки газопровода могут быть установлены довольно точно с помощью обычных формул теплопередачи.

Чтобы избежать промерзания металлических надземных газопроводов, по которым проходит холодный, обычно очищенный газ, газопроводы изолируют снаружи шлаковой ватой и для прочности покрывают асбоцементной штукатуркой.

Если изоляция надземного газопровода не гарантирует от промерзания, то газ или газопровод подогревают. Для этой цели применяют различные способы: прокладку рядом паропровода, впуск в газопровод пара, внешний или внутренний обогрев газопровода с помощью газовых горелок и т. д.

Иногда прокладывают паровую магистраль и при горячем газе, так как это дает возможность использовать пар для выдувки газа и воздуха из газопровода, а также для прочистки газопровода от пыли и сажи.

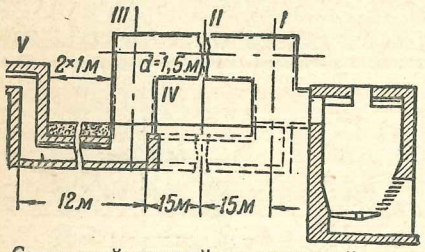
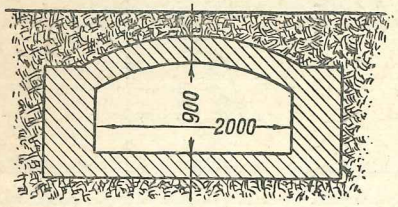
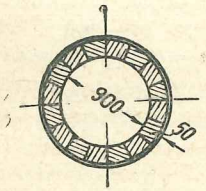
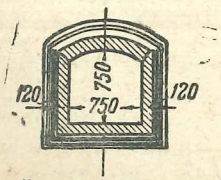
При холодном неочищенном дровяном и торфяном газе, как показала практика работы новейших установок, железные нефутерованные газопроводы могут разъедаться уксусной кислотой. Для предохранения от разъедания их приходится покрывать специальными веществами: бакелитом, кислотоупорной керамикой, деревом, диабазом. Хорошо себя оправдала изоляция по дереву кошмой, пропитанной каменноугольной смолой. Предотвратить разъедание газопро-

[1] Известны случаи отравлений газом со смертельным исходом в приямках кирпичных подземных газопроводов очищенного газа.

[2] Короткие участки кирпичных газопроводов смолистого газа, находящиеся под малым разрежением, встречаются например в стекольном производстве между газовым клапаном и регенератором.

Таблица 64

Падение температуры газа в каналах

Конструкция	Площадь сечения (в $м^2$)	Длина (в м)	Начальная температура (в °С)	Конечная температура (в °С)	Падение температуры на 1 *пог. м* (в °С)	Температура воздуха (в °С)
			I 430 II 340 III 240 IV 180			
Сплошной линией — железный газопровод нефутерованный	1,77	35	V 165		7	3
Пунктиром — подземный кирпичный канал	2,0	40	430	300	3	5
						
Подземный канал	1,8	17	870	794	4,4	5
						
Подземный канал	0,64	58	903	530	6	5
Надземный канал в здании	1,2	8,4	505	470	4,2	20
						
Надземный канал в здании	0,6	20	445	390	2,8	20

водов уксусной кислотой можно также путем подогрева газа, в результате чего из газа не будет осаждаться влага, а вместе с ней и уксусная кислота.

Очистка газопроводов

Газ из генераторов отводится или вверху шахты под сводом или через отверстие в своде или крышке (рис. 81). В случае значительного уноса газом пыли и сажи вблизи генератора помещают пылеуловители. В установках, в которых отдельные генераторы не снабжены индивидуальными очистными приспособлениями, газ из генератора и пылеуловителя (если таковой имеется) через соединительный газопровод обычно попадает в коллектор-газосборник, представляющий собой газопровод, в котором собирается газ из различных генераторов. При отсутствии мокрой очистки газа коллектору придают большие размеры, и вследствие его большой горизонтальной проекции в нем происходит значительное выпадение взвешенных частиц.

Если газ не уносит большого количества пыли из генератора, что может быть при газификации дров и торфа, то он непосредственно из генератора поступает в коллектор.

При пыльном газе коллектор и газопроводы снабжаются установленными на близком расстоянии друг от друга пылевыми мешками, снабженными клапанами для спуска пыли. Вместо частой расстановки мешков можно придать коллектору и газопроводам овальную форму, снабдив их в нижней части на небольшом расстоянии друг от друга отверстиями с клапанами для удаления пыли.

Иногда отрезкам газопроводов, в которых выделяется сухая пыль, придают крутой уклон для ссыпания пыли к пылеуловителям, расположенным в низших точках газопровода.

Пыль, собирающаяся в пылеуловителях, коллекторе и газопроводах, легко высыпается. Значительно труднее удаление липкой сажи и пыли, пропитанных смолой, выделяющейся при сильном охлаждении газа. Эта масса нарастает на стенках газопроводов и уменьшает их сечение. Поэтому газопроводы периодически подвергают чистке. Для этого в верхней части газопровода на небольших расстояниях, допускающих прочистку любой точки, предусматривают отверстия, в которые может быть просунут скребок. Также предусматриваются большие отверстия для обслуживания с торцов, у горловин генераторов и по длине газопровода.

Для большей доступности надземных газопроводов и их обслуживания устраивают лестницы и площадки с ограждениями.

Кирпичные газопроводы также снабжаются отверстиями для чистки и мешками для осаждения пыли и смолы. Подземные газопроводы обслуживаются с помощью приямков.

В местах поворотов газопроводов устраиваются мешки для сбора и удаления выпадающих из газа взвешенных частиц.

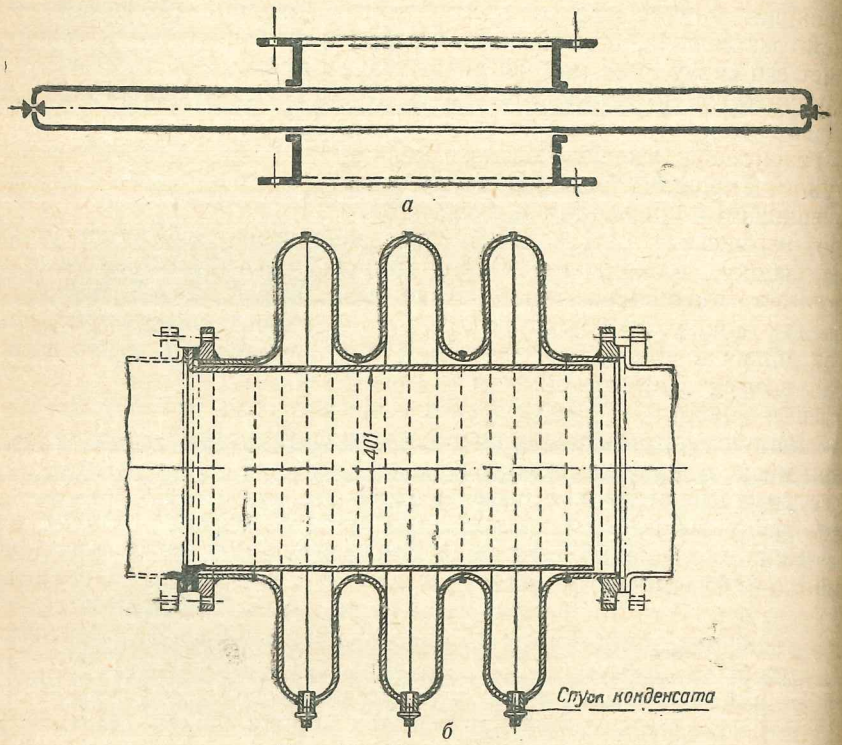
При холодном газе и выделении жидкой смолы и влаги в коллекторе и газопроводах последние выполняют с уклонами в $^1/_{100}$ и больше, причем в низших точках этих газопроводов устанавливают отводные вертикальные трубы диаметром в 100 *мм*. Эти отводные трубы выходят в конденсационные металлические или бетонные коробки-

горшки. Конденсат стекает из газопровода в горшки по мере его выделения.

Для выпуска газа и выжигания газопроводов их снабжают выдувными трубами или присоединяют к дымовым трубам печей.

Скорости в газопроводах низкого давления

Кирпичные газопроводы рассчитывают на скорость в 0,5—1 *м/сек* при 0°. В металлических коллекторах неочищенного газа принимаются скорости в 0,75—2 *м/сек* при 0°, а в газопроводах — 1—3 *м/сек* при 0°.



а

б

Рис. 122. Компенсаторы:
а—дисковый, *б*—линзовый

Газопроводы очищенного газа рассчитывают на скорость в 6—12 *м/сек*. В отношении выбора диаметра газопроводов можно отчасти руководствоваться соображениями, приведенными для дальнего газоснабжения (см. ниже).

Различные схемы соединения генератора с коллектором и газопроводом описаны в главе VI.

Компенсаторы

В случае значительной длины металлические газопроводы при изменении температуры удлиняются и укорачиваются на значительную величину. Чтобы избежать деформаций газопроводов и их соединений, применяют компенсаторы (рис. 122).

В местах установки компенсаторов перила и площадки, идущие по верху газопровода, следует прерывать.

Расположение газопроводов

Расположение газопроводов имеет большое значение при пуске и выпуске газа и при работе в смысле возможности образования в них взрывчатой смеси.

Воздух, более тяжелый, чем газ, попадая в газопровод сверху, проходит вниз и смешивается с газом, образуя взрывчатую смесь. Если же воздух подается в нижнюю часть газопровода, то он заполняет его снизу, постепенно выдавливая газ вверх.

Легкий газ, попав снизу в газопровод, заполненный воздухом, поднимается вверх и смешивается с воздухом, образуя взрывчатую смесь; попадая же сверху, он постепенно заполняет газопровод, вытесняя воздух книзу. Таким образом газ должен вытесняться вверх, а воздух или взрывчатая смесь — вниз.

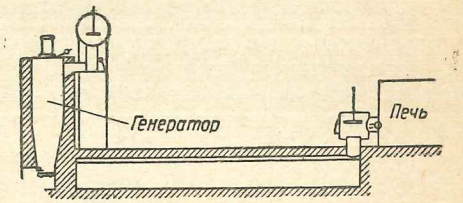


Рис. 123. Неудачное расположение газопровода

В случае устройства кирпичных подземных газопроводов по рис. 123 при пуске газа не может быть хорошо удален воздух, который как более тяжелый, чем газ, оседает на дне канала, и образуется некоторое количество взрывчатой смеси.

Если газопровод короток, то, как указывает проф. Грум-Гржимайло [126], делу может помочь подвод газа снизу; при длинных же газопроводах для удаления взрывчатой смеси газопровод должен иметь специальное приспособление, при котором взрывчатая смесь, более тяжелая, чем газ, и ложащаяся на дно, может быть удалена с пода газопровода через специальные трубы, немного не доходящие до пода канала.

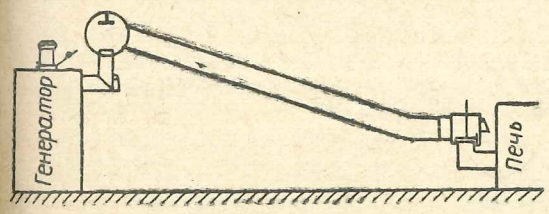


Рис. 124. Правильное расположение газопровода

При подаче газа к месту потребления следует стремиться располагать газопровод таким образом, чтобы он был выше места, в которое подается газ, например горелки, и тогда, если в горелках давление равно внешнему (0), во всех частях газопровода давление будет положительным. Если давление в газопроводе упадет, воздух из горелки войдет в газопровод и как более тяжелый, чем газ, будет запол-

нять газопровод, не смешиваясь с газом и постепенно выдавливая его кверху (рис. 124).

Наоборот, при устройстве газопровода по рис. 123 в случае падения давления и проникновения воздуха в газопровод воздух, как более тяжелый, будет падать вниз, смешиваясь с газом и образуя взрывчатую смесь. Кроме того даже при положительном давлении газа на уровне горелки в газопроводе ниже горелки давление может быть отрицательным, вследствие чего возможно засасывание через трещины воздуха и образование взрывчатой смеси.

В отношении расположения газопроводов, находящихся под давлением, близким к атмосферному, следует руководствоваться, по предложению проф. Грум-Гржимайло, следующими правилами в смысле обеспечения безопасности газопроводов.

1. Не следует соединять общим газопроводом устройства, работающие при различных условиях тяги и разнохарактерные по своему назначению или расположенные на различных уровнях. Всякое такое устройство или группа устройств должны иметь свой газопровод, начинающийся от такого места газопровода, где никогда не бывает отрицательного давления.

2. Направление движения газа в газопроводах должно быть нисходящим. Восходящего направления надо избегать.

3. Длинные газопроводы лучше делать с падением в сторону движения газов.

4. Устройства для продувки взрывчатой смеси должны брать смесь из самой низкой части газопровода.

Подача газа на большое расстояние и при разветвленной сети

Передача газа на дальнее расстояние в последнее время находит все большее распространение.

В Америке имеется весьма развитая сеть для естественного газа с теплотворной способностью около 10 000 *кал/м³*, в других странах имеются развитые сети для коксовального газа с теплотворной способностью около 4000 *кал/м³*. Дальность передачи газа достигает в Америке 1500 *км*, в Германии — 300 *км*.

В СССР дальнее газоснабжение не получило еще должного развития, имеются только небольшие сети для естественного газа в районе Баку и для коксовального — в Донбассе.

Строительство мощных заводов, в которых имеются излишки высококалорийного газа, использование местных топлив для получения газа в газоцентралях, особенно в условиях дефицита жидкого топлива и необходимости замены последнего газообразным, увеличение использования естественного газа — все это несомненно побудит в ближайшее время к строительству сетей дальнего газоснабжения.

На стоимость транспорта газа помимо стоимости газопровода влияет ряд факторов, причем стоимость транспорта уменьшается с увеличением теплотворной способности газа, с увеличением количества передаваемого газа, с уменьшением расстояния передачи и с выравниванием суточного и годового графика подачи газа.

Как указывает Штарке [152], для передачи газа на расстояние в 10 *км* независимо от количества передаваемого газа требуются давления не выше 2—3 *ат*. Для передачи на 100 *км* достаточно давление в 5—10 *ат* и для передачи на 300 *км*—20—30 *ат*. Минимальное количество газа, могущее быть экономичным для передачи на расстояние 10 *км*, — 1000 *м³/час*, на расстояние до 100 *км* — 5000 *м³/час*, на расстояние до 150 *км* — 10 000 *м³/час* и на расстояние до 250 *км* — 25 000 *м³/час*.

Для количеств газа от 50 000 до 200 000 *м³/час* экономические условия меняются мало, причем эти количества могут во всех случаях транспортироваться на расстояние до 300 *км*. Естественно, что при уменьшении расстояния транспорта уменьшается стоимость такового. При транспорте газа до 300 *км* возможно избежать устройства дополнительных компрессорных станций. В германских ценах стоимость дальней передачи газа (компрессия, газопровод и потери) при изменении расстояния от 10 до 300 *км* для количеств газа от 50 000 до 200 000 *м³/час* возрастает от 0,28 до 0,83 золотого пфеннига.

Сравнение стоимости передачи на 10 *км* генераторного газа с теплотворной способностью в 1300 *кал/м³* со стоимостью передачи коксового газа (4000 *кал/м³*) показывает, что расходы в обоих случаях на 1 *м³* почти одинаковы, и следовательно на 1000 *кал/м³* генераторного газа эти расходы очень велики. По причине высокой стоимости дальняя передача смешанного генераторного газа вряд ли целесообразна.

По Штарке в германских условиях для малых расстояний и количеств стоимость перевозки топлива ниже стоимости перекачки высококалорийного газа. При больших количествах и с увеличением дальности передачи стоимость перекачки газа становится меньше стоимости железнодорожного фрахта и содержания топливного хозяйства. По данным Штарке, при 5000 *м³/час* и расстоянии в 100 *км* стоимость перекачки газа и железнодорожного фрахта одинакова; при 25 000 *м³/час* и расстоянии в 100 *км* перекачка газа дешевле провоза топлива; при 50 000 *м³/час* и расстоянии в 100 *км* перекачка газа обходится вдвое дешевле стоимости перевозки топлива и содержания складов.

1. Прокладка газопроводов. При дальнем газоснабжении, наличии разветвленной сети газопроводов, загроможденности заводской территории и цехов металлические газопроводы прокладывают в земле.

При низких давлениях — до 200 *мм* вод. ст. — эти газопроводы изготовляются иногда из чугуна. Для более высоких давлений применяют почти исключительно стальные трубы. До диаметра в 300 *мм* применяют цельнотянутые трубы, при бо́льших же диаметрах — трубы сваренные водяным газом или электросварные. Чугунные трубы, более долговечные, чем железные, применяют для распределительных сетей.

Соединения чугунных труб делаются раструбные и фланцевые. Уплотнение раструбов производится преимущественно свинцом, иногда цементом; фланцевые соединения скрепляются болтами и уплотняются асбестовым картоном.

Соединение стальных труб производится при небольших диаметрах (до 50 *мм*) на резьбе или фланцах, при больших диаметрах — на фланцах или муфтах.

Подземные газопроводы прокладываются ниже глубины промерзания почвы во избежание замерзания конденсата. Эта глубина зависит от климатических условий.

Температурные колебания в подземных газопроводах невелики. Их не всегда снабжают компенсаторами, так как газопровод, имеющий ряд сварных стыков и изгибов, самостоятельно компенсирует небольшие изменения длины. Применяются компенсаторы линзового типа, так как сальниковые не плотны.

В населенных местностях при прокладке газопровода нижняя часть траншеи засыпается щебнем или гравием, сверх которого насыпается земля.

На расстоянии в 100—150 *м* отрезки траншеи отделяются друг от друга глинистыми перемычками. Таким образом выделяющийся из газопровода в случае утечки газ может свободно протекать в слое щебня или гравия, и утечка может быть обнаружена с помощью вставленных в траншею железных трубочек и соответствующих реактивов на окись углерода.

При наличии нескольких специальных подземных сооружений, прокладываемых в одном направлении, например водо-, газо-, паропроводов, кабелей и т. д., таковые на больших заводах и в городах прокладывают в специальных подземных бетонированных коллекторах, имеющих высоту в 1,75—2 *м* и вполне доступных во всю длину для осмотра и обслуживания.

Для стекания конденсата подземному газопроводу придается уклон: 5—8 *мм* на 1 *пог. м*. В низших точках газопроводов устанавливают на расстоянии 100 — 160 *м* конденсационные горшки, располагаемые в бетонированных колодцах.

Емкость конденсационных горшков принимают равной 5—7-дневному количеству конденсата, выделяющегося в зимнее время, т. е. в период максимального его выделения. Для откачки накопившейся жидкости горшки снабжают трубочками.

Подземные газопроводы подвержены разрушающему действию солей и кислот, содержащихся в почве. Для предохранения от разъедания трубы покрываются краской и изоляцией.

Труба перед покраской тщательно очищается проволочными щетками; окраска труб производится или суриком на олифе, или смолой, или асфальтом. Обмотка труб производится защитной тканью или специальной бумагой, или кровельным толем. Трубы могут быть также защищены слоем цемента.

Особенную опасность представляет разъедание труб в зоне блуждающих токов, возникающих в районе электрических дорог. С блуждающими токами борются путем соответствующего надзора за состоянием рельсовой сети.

Прокладка подземных газопроводов, состоящая из ряда дорого стоящих операций, как-то: рытье траншей, выравнивание их постели или трамбовка дна, засыпка траншей, погрузка, укладка, стягивание, спуск, свинчивание, изгибание, очистка, окраска, обмотка и цементировка труб, — обычно механизируется.

Прокладку газопровода через реку производят по существующему или специально сооруженному мосту, под дном реки в специальной

траншее или по дну реки. Хотя прокладка газопровода по мосту или в туннеле и допускает в дальнейшем возможность обслуживания газопровода и проведения новых работ, но все же вследствие высокой стоимости такой прокладки газопроводы обычно прокладывают непосредственно по дну реки. У этих газопроводов, снабженных защитными хомутами, образуются обычно насыпи, воспринимающие в дальнейшем удары движущихся с водой тел. На случай аварии газопровода по дну реки прокладывают 2—3 рукава, соединенные на берегу в общий коллектор и отделенные задвижками.

2. Выбор диаметра газопровода. При выборе диаметра газопровода и давления газа нужно учитывать расход и стоимость металла и энергии, стоимость прокладки газопровода, стоимость компрессорного оборудования, эксплоатационные расходы, начисления и т. д.

Применение труб больших диаметров дает возможность в известных пределах давлений уменьшить требуемое давление газа и расход металла. Однако при очень больших диаметрах труб расходы на оборудование траншей могут оказаться столь большими, что аннулируют экономию, получаемую от уменьшения расхода металла. Следует также учитывать, что минимальная толщина трубы ограничивается условиями изготовления и транспорта.

Стоимость металла является самой большой статьей в общей стоимости газопровода.

При движении газа по трубам напор затрачивается на преодоление местных сопротивлений и сопротивления от трения о стенки. При малом манометрическом напоре и принятии газа несжимаемым связь скоростного напора со скоростью выражается формулой:

$$h = \frac{v^2}{2g}\delta,$$

где h — скоростной напор в *кг/м²* (*мм* вод. ст.),
v — скорость газа в *м/сек*,
g — ускорение силы тяжести, равное 9,81 *м/сек²*,
δ — объемный вес газа в *кг/м³*.

В газопроводах со значительной протяженностью превалирующее значение имеет сопротивление от трения, выражаемое формулой:

$$H = \frac{\lambda L \pi d v^2 \delta}{\frac{\pi d^2}{4} g} = \frac{4\lambda L \delta v^2}{dg} = 8\lambda \frac{L}{d} h,$$

где H — сопротивление от трения в *кг/м²* (*мм* вод. ст.),
L — длина газопровода в *м*,
d — диаметр газопровода в *м*,
λ — коэфициент сопротивления от трения.

Величина коэфициента сопротивления от трения зависит от материала и состояния стенок труб, от их диаметра, от плотности и вязкости газа.

Изменения направления движения и скорости газов учитываются соответствующими коэфициентами при h.

Приводимые ниже величины λ_1 в зависимости от числа Рейнольдса равняются 8λ по выведенной выше формуле для значения величины H.

При скорости ниже критической (при гаген-пуазейлевском режиме) величина $\lambda_1 = \frac{64}{R_e}$, т. е. сопротивление от трения пропорционально первой степени скорости и обратно пропорционально квадрату диаметра. При скорости, выше критической, сопротивление от трения пропорционально, как видно из дальнейшего, скорости в степени 1,75 — 1,88.

При скорости выше критической для гладких поверхностей по Блазиусу $\lambda_1 = \frac{0{,}3164}{R_e^{0{,}25}}$ и для шероховатых металлических поверхностей по Омбеку $\lambda_1 = \frac{0{,}129}{R_e^{m}}$, где R_e — число Рейнольдса, а m изменяется от 0,17 до 0,12, уменьшаясь с увеличением степени шероховатости. Для кирпичных каналов по Доброхотову $\lambda_1 = \frac{0{,}175}{R_e^{0{,}12}}$.

Приближенно можно принять для кирпичных каналов $\lambda_1 = 0{,}05$ и для металлических: слабо окисленных $\lambda_1 = 0{,}04$, чистых $\lambda_1 = 0{,}025$, покрытых коркой $\lambda_1 = 0{,}045$.

При постоянной скорости газа коэфициент сопротивления от трения медленно уменьшается с увеличением плотности газа.

Присутствие в трубах конденсата, разъедание материала труб газами и конденсатом, скопление в отдельных участках ржавчины и частиц металла, уносимых газом, увеличивают шероховатость труб.

При расходе газа в Q $м^3/сек$ получаем из вышеприведенной формулы для сопротивления от трения:

$$Q = 1{,}2\sqrt{\frac{Hd^5}{\lambda L\delta}}.$$

Приведенная формула не учитывает изменения плотности газа и изменения объема в зависимости от изменения давления и поэтому может применяться только при низких давлениях, когда сопротивление выражается в десятках и сотнях *мм* вод. ст.

На основе указанной формулы построена формула Поля [152], применяющаяся для расчета сетей низкого давления и имеющая следующий вид:

$$Q = 0{,}707\sqrt{\frac{Hd^5}{\gamma L}},$$

где Q — количество газа в $м^3/час$,
d — диаметр газопровода в *см*,
H — падение давления в *мм* вод. ст.,
L — длина газопровода в *м*,
γ — удельный вес газа по отношению к воздуху.

Формула Поля не учитывает изменения величины коэфициента сопротивления от трения в каждом отдельном случае.

Когда разница между начальным и конечным давлениями значительна, что имеет место в дальних газопроводах, она существенно отражается на изменении объема и плотности газа. По мере удаления от компрессорной станции давление газа уменьшается, и объем его увеличивается.

Для расчета диаметра дальних газопроводов предложен ряд формул.

Формула Веймаут-Толя следующая:

$$d = \sqrt[5]{\frac{Q^2 \cdot s \cdot l}{c^2(p_a^2 - p_e^2)}},$$

где Q — расход газа в $м^3/сек$,
d — диаметр газопровода в *м*,
l — длина газопровода в *м*,
s — удельный вес газа по отношению к воздуху,
c — коэфициент, зависящий от коэфициента сопротивления в трубах,
p_a — давление в начале газопровода в *ат* (абс.),
p_e — давление в конце газопровода в *ат* (абс.).

Формула Биля, которой также пользуются для расчета газопроводов, имеет следующий вид:

$$d = \sqrt[5]{\frac{R\gamma l Q^{1{,}875}}{p_a - p_e}},$$

где d — диаметр газопровода в *см*,
R — постоянный коэфициент, равный 0,908,
γ — удельный вес газа по отношению к воздуху,
l — длина газопровода в *м*,
Q — количество транспортируемого газа в $м^3$,
p_a — начальное давление в *ат* (абс.),
p_e — конечное давление в *ат* (абс.).

3. Определение толщины стенок газопровода. При дальнем газоснабжении газ подвергают сильному сжатию, соответственно чему применяют трубы с достаточной толщиной стенок.

Толщина стенки газопровода рассчитывается по формуле для стенки полого цилиндра, подверженного внутреннему давлению выше атмосферного.

При малых толщинах стенка [152] может быть рассчитана по формуле:

$$\delta = \frac{pD}{2k_p},$$

где δ — толщина стенки в *см*,
D — внутренний диаметр трубы в *см*,
p — давление внутри трубы в $кг/см^2$,
k_p — допускаемое напряжение на разрыв по оси в стенках трубы в $кг/см^2$.

Допускаемое напряжение на разрыв по Баху для случая нагрузки от нуля до максимума составляет 800 *кг/см²* для твердого материала и 600 *кг/см²* — для мягкого.

Толщина стенок подземного газопровода определяется также по внешним условиям: давлению грунта, подвижной нагрузке и т. д.

К полученной величине добавляют 2—3 *мм* на ржавление и ослабление швов.

Газодувки и компрессоры

Для транспорта газа при небольших давлениях пользуются центробежными вентиляторами; при несколько бо́льших давлениях применяют ротационные вентиляторы и компрессоры и при больших — поршневые компрессоры и турбокомпрессоры (газодувки).

Центробежные вентиляторы, ротационные вентиляторы и компрессоры и газодувки описаны в главе IV. Ниже приводятся лишь некоторые данные, относящиеся к компрессорам.

Число оборотов поршневого компрессора, обычно имеющего малые скорости поршня, невелико, что препятствует непосредственному соединению компрессора с электромотором.

Турбокомпрессоры могут непосредственно соединяться с быстроходными двигателями. Для конечных давлений в 6—8 *ат* турбокомпрессоры могут быть применены в случаях достаточно большой производительности и хорошей очистки газа.

Для подач малых количеств газа могут быть применены ротационные компрессоры.

Сжатие и расширение газов в компрессорах не соответствует ни изотермическому, ни адиабатическому процессу, так как практически не осуществимы ни идеальное охлаждение газа, ни полное отсутствие охлаждения. Процессы в компрессорах протекают по политропе, приближаясь то к изотерме, то к адиабате в зависимости от условий охлаждения.

Теоретически потребная работа для компрессии газа в различных случаях следующая:

$$L_{из} = P_e \cdot V \cdot ln \frac{p_a}{p_e};$$

$$L_{ад} = P_e \cdot V \cdot \frac{k}{k-1}\left(\frac{T_a}{T_e} - 1\right) = P_e V \frac{k}{k-1}\left[\left(\frac{p_a}{p_e}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1\right],$$

где $L_{из}$ — потребная работа при изотермическом сжатии в *кгм*,

$L_{ад}$ — то же при адиабатическом сжатии в *кгм*,

P_e — давление газа при всасывании в компрессор в *кг/м²*,

V — объем засасываемого газа в *м³*,

T_a и T_e — температуры газа — конечная и начальная в ° К,

k — показатель адиабатического сжатия,

p_a и p_e — давления газа — конечное и начальное в *ат* (абс.).

Работа, затрачиваемая при адиабатическом сжатии, больше, чем при изотермическом.

Показатели адиабатического сжатия следующие: для кислорода, азота, воздуха и окиси углерода — 1,4; водорода — 1,41; углекислоты — 1,31; ацетилена — 1,29; этилена — 1,21; водяного пара — 1,3.

В больших компрессорах кривая сжатия приближается к адиабате, и для расчета компрессоров принимается адиабатическое сжатие.

При высоких давлениях применяют ступенчатую компрессию (обычно до трех ступеней). При n ступенях теоретически потребная работа для адиабатического сжатия составляет:

$$L^n_{ад} = n \cdot P_e \cdot V \cdot \frac{k}{k-1}\left[\sqrt[n]{\left(\frac{p_a}{p_e}\right)^{\frac{k-1}{k}}} - 1\right].$$

К. п. д. компрессора—60—65%; к. п. д. мотора, включая редуктор, — 0,8—0,88 (более высокие значения для больших мощностей).

В известных случаях — при большой протяженности газопроводов или отдельных ветвей и необходимости в высоком давлении для отдельных потребителей, может явиться выгодной установка нескольких компрессорных станций по пути газопровода.

2. КЛАПАНЫ И ЗАТВОРЫ

Классификация клапанов

Клапаны классифицируются в основном по назначению и по устройству.

В зависимости от назначения можно разделить клапаны на следующие группы: клапаны для включения и выключения газа, для регулирования количества газа, предохранительные, для выброса пыли и обслуживания.

Один и тот же клапан может одновременно выполнять и несколько назначений.

Клапаны для включения должны обладать плотностью и соответствующей прочностью. Особенно высокие требования предъявляются к ним при больших давлениях газа, больших размерах газопроводов, при сильных колебаниях температур и разъедающем действии газов.

Изменение количества протекающего газа производится клапанами, служащими для включения и выключения газа, если только они допускают достаточно легкое и быстрое управление и регулирование. Гидравлические клапаны в качестве регулирующих поступление газа (кроме тарельчатых) обычно не применяются.

Предохранительные клапаны подразделяются в свою очередь на две подгруппы: клапаны, предупреждающие разрушение газопровода при чрезмерном повышении давления, и клапаны, предупреждающие проникновение газа из одного участка в другой. Последние клапаны называют часто обратными. Предохранительными клапанами могут служить клапаны и других типов.

Клапаны для обслуживания предназначаются для чистки газопроводов, периодического проникновения внутрь, осмотра, ремонта и т. д.

В зависимости от устройства клапаны подразделяют по способу создания уплотнения — сухому и гидравлическому.

В клапанах с сухим уплотнением последнее создается прижимом одних поверхностей к другим. Следовательно плотность зависит от обработки и состояния поверхностей, чистоты и разъедающего действия газа, прижима плоскостей, давления газа, температуры газа и т. д. Устройство клапанов зависит от указанных условий.

В клапанах с гидравлическим уплотнением плотность создается сравнительно легко; обстоятельствами, могущими затруднить их применение, является большое давление газа, сильное испарение воды при горячем газе, а также охлаждение последнего.

В одних гидравлических затворах (затворы с погружением) имеются постоянно погруженные в воду поверхности, создающие затвор; в других же (разделительные затворы) водой заливают проход для газа только при выключении газопровода.

Количество воды, находящейся в гидравлических затворах, должно быть большим по сравнению с количеством воды, находящейся под давлением и вытесняемой из погруженного в воду трубопровода. Объем затворов должен быть достаточным для восприятия выбрасываемой или вытесняемой жидкости. Должна учитываться возможность опорожнения затвора засасыванием вследствие разрежения, возникающего в трубопроводах и аппаратах при недостаточном притоке газа после взрыва, так как за каждой волной давления следует засасывание.

Глубина погружения затворов в воду должна быть значительно больше высоты столба воды, соответствующего давлению газа, ввиду суммирования при изменениях давления волн давления и сильных колебаний уровня воды даже при отсутствии взрыва.

Гидравлические клапаны помимо того, что являются затворами, часто одновременно служат в качестве предохранительных клапанов. При взрыве вода из них выдавливается, частично выплескивается и вновь принимает горизонтальную поверхность.

Обычные конструкции клапанов для включения и регулирования количества газа

Для включения и выключения генераторов в простейшем случае применяют шиберы. При низкой температуре газа, например при дровяном и торфяном газе, их делают из тонкого листового железа (4—5 *мм*); при высокой температуре газа, например при каменноугольном газе, применяют чугунные шиберы. Вертикальное положение шиберов не дает достаточной плотности, так как между шиберами и стенками газопровода остается щель. В горизонтальном положении они более плотны, так как давят на кладку или раму своим весом со всех сторон отверстия; кроме того горизонтальные шиберы можно засыпать песком.

Более надежным устройством, применяемым в случае газа невысокой температуры, являются перекидные рукава (рис. 125). Они помещаются в чугунных желобах с водой, создающих водяной затвор для отделения газопровода от атмосферы. Для выключения генератора достаточно сбросить рукав и поставить на жолоб чугунную или железную крышку. Материалом для рукавов служит 2—3-миллиметровое железо.

Иногда в перекидных рукавах устраивают внутренние клапаны для отключения генераторов от коллектора без подъема рукава с целью избежать выделения значительного количества газа. Внутренние клапаны или прижимаются к стенкам отверстия, или садятся в желоба, заполненные водой, создавая затвор.

Удовлетворительное уплотнение достигается устройством тарельчатых клапанов (рис. 126), устанавливаемых при горячем газе за

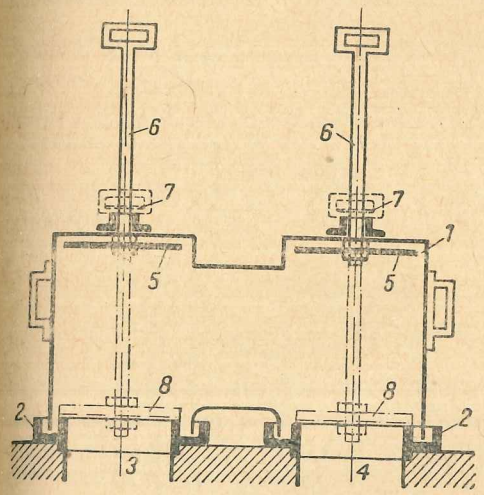


Рис. 125. Гидравлический затвор с перекидным рукавом:

1—корпус рукава, *2*—рамки с желобами для воды, *3* и *4*—ввод и отвод газа, *5*—внутренние клапаны, *6*—штоки клапанов, *7*—штыри, удерживающие клапаны в поднятом положении, *8*—клапаны в нижнем положении

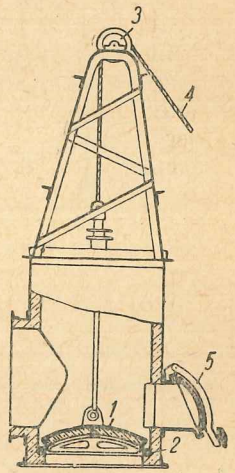


Рис. 126. Тарельчатый клапан:

1—тарелка, *2*—седло, *3*—блок, *4*—трос, *5*—предохранительный клапан

пылеуловителями для включения и выключения генератора. Эти же клапаны при неочищенном газе применяются у печей для регулировки количества подаваемого газа. Они применяются как в железных, так и в кирпичных газопроводах; их ставят в местах перехода вертикальных каналов в горизонтальные. Монтируются клапаны в цилиндрической или квадратной коробке, снабженной чугунной или железной крышкой, через которую проходит шток клапана. Самый клапан состоит из чугунной тарелки с конической боковой поверхностью, прижимаемой к чугунному седлу — кольцу. Тарелка подвешена на штоке и связана с ним шарниром или же болтом или чекой. Подъем тарелки достигается с помощью троса, перекинутого через блок, от руки или лебедкой, или с помощью колонки с винтом и

маховичка. При высоких температурах газа тарелки и седла должны выполняться из гематитового чугуна.

Высота коробки клапана устанавливается по полному его открытию, при котором боковое отверстие входа или выхода совершенно свободно и не заслоняется клапаном. При больших давлениях газа крышки коробок снабжаются сальниками для штоков тарелок, предохраняющими от выделения газа.

Коробка снабжается предохранительным клапаном, через который возможно засыпать тарелку песком при выключении генератора для придания клапану большей плотности; через этот клапан можно также проникнуть внутрь.

Подобные тарельчатые клапаны без гидравлических затворов применяются для горячего газа. Они не являются идеально плотными,

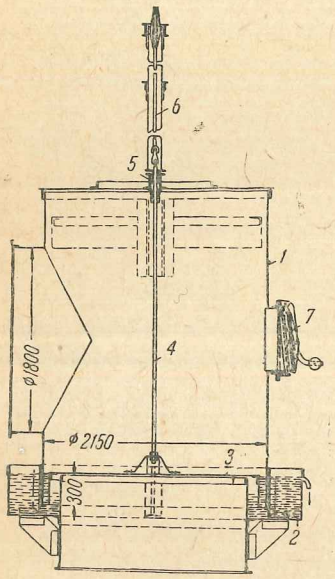


Рис. 127. Предохранительный клапан с гидравлическим затвором:

1—коробка клапана, *2*—гидравлический затвор, *3*—тарелка клапана, *4*—шток клапана, *5*—сальник, *6* — трос, *7* — предохранительный клапан

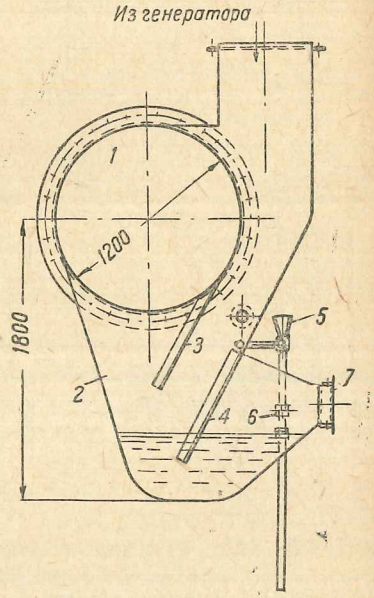


Рис. 128. Гидравлический затвор

поэтому в случае невысокой температуры и смолистости газа (из дров, торфа, бурого угля) применяются тарельчатые клапаны, снабженные гидравлическими затворами (рис. 127).

На рис. 168 представлено соединение металлическим газопроводом генератора с коллектором при каменноугольном газогенераторе. Газ выходит по футерованному колену из генератора и направляется в пылеуловитель и отсюда в коллектор. У первого поворота установлен тарельчатый клапан с винтовой колонкой для включения и выключения генераторов.

На рис. 57 представлено соединение торфяного генератора с коллектором с помощью перекидного рукава, снабженного клапанами.

На рис. 52 представлено соединение дровяного генератора с коллектором с помощью короткого соединительного горизонтального канала. Отключение генератора производится опусканием вертикального шибера.

Кроме плоских шиберов, перекидных рукавов и тарельчатых клапанов для включения и выключения преимущественно при смолистом газе невысокой температуры применяют также гидравлические затворы типа, изображенного на рис. 128. Они состоят из железного,

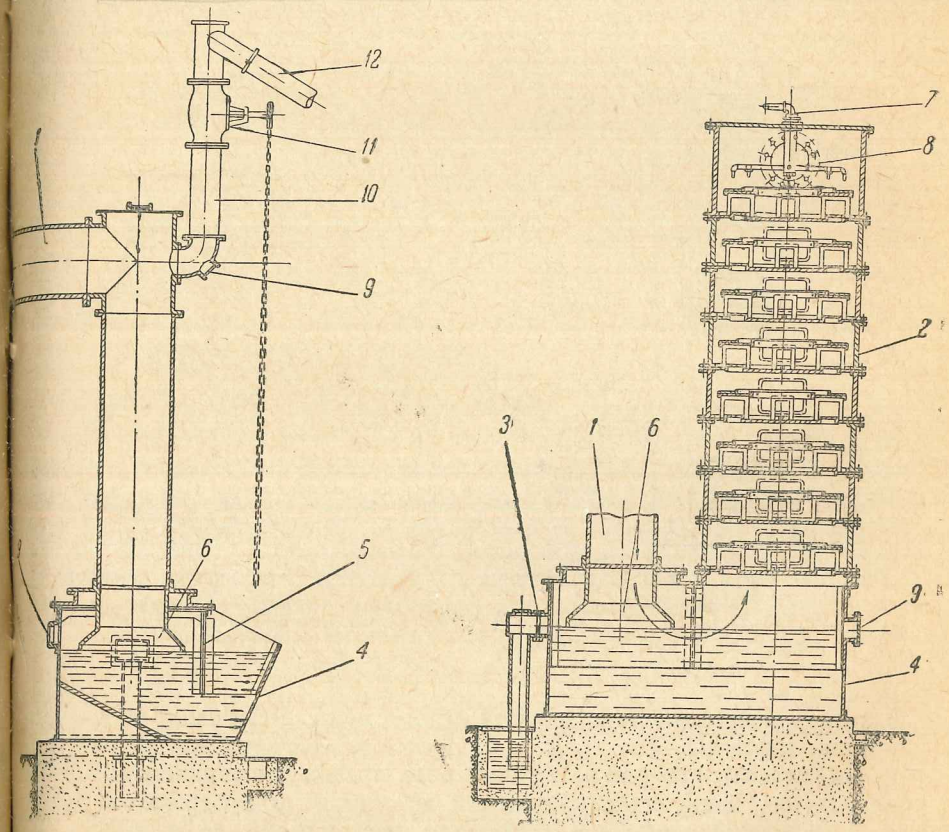


Рис. 129. Гидравлический затвор с барботером и тарельчатый охладитель:

1—газопровод из генератора, *2*—тарельчатый охладитель, *3*—щель для стока воды, *4*—корпус затвора, *5*—перегородка, *6*—барботер, *7*—подвод воды в охладитель, *8*—отвод газа, *9*—люки, *10*—пусковая труба, *11*—клапан пусковой трубы, *12*—ввод продувной трубы от скруббера

прикрепленного к газосборнику *1* сосуда *2*, разделенного перегородками *3* и *4* и соединенного с генератором. Через воронку *5* в затвор поступает вода. Если вентиль *6* закрыт, то вода находится на уровне воронки, и генератор выключен из сети. Если открыть вентиль *6*, то уровень воды опустится, и генератор соединится с коллектором. Водяной затвор снабжен отверстием *7* для чистки на ходу, так как

на дне его собираются пыль и смола, уносимые газом из генератора. Нижняя перегородка *4* служит для отделения затвора от атмосферы.

Эти затворы служат и для надежного отключения участков газопроводов.

Другой гидравлический затвор представлен на рис. 129. В нем газ входит через трубу *1*, проходит водяной затвор, пробулькивает через воду и выходит в тарельчатый охладитель *2*. При прекращении подачи газа труба *1*, подающая газ, остается выключенной затвором. Уровень воды в гидравлическом затворе остается постоянным и может регулироваться путем установки положения щели *3* для стока воды.

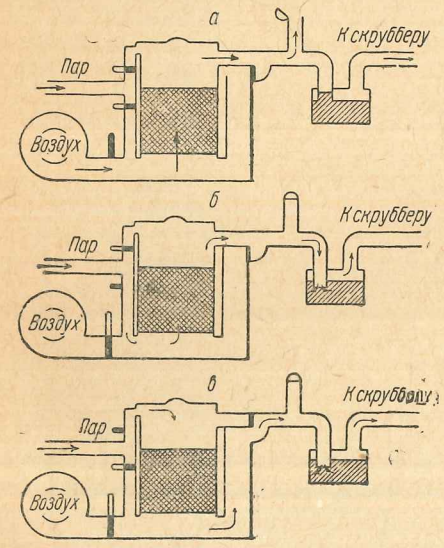


Рис. 130. Путь газов и положение клапанов:

а—в период воздушного дутья, *б*—в период дутья пара снизу, *в*—в период дутья пара сверху

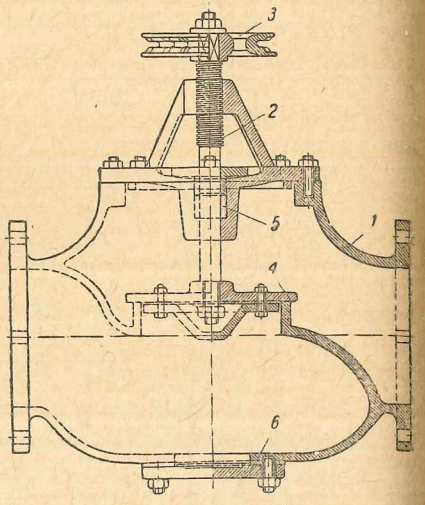


Рис. 131. Тарельчатый вентиль:

1—корпус, *2*—винт, 3—маховичок, *4*—тарелка вентиля, *5*—сальник, 6 — контрольный лючек

В затвор постоянно течет из охладителя вода, стекающая через указанную щель *3*.

Описанный затвор играет также роль предохранительного клапана. Недостаток воды, выплескиваемой частично при взрыве наружу, быстро восстанавливается благодаря постоянному ее притоку.

На рис. 200 представлена схема присоединения торфяного генератора к коллектору с помощью заливаемого водой гидравлического затвора.

Гидравлические затворы с барботером применяются и в установках водяного газа. Схема подобного затвора представлена на рис. 130; здесь показано различное положение клапанов в зависимости от рода и направления дутья.

При большом давлении газа, имеющем место в период дутья пара, задвижка на трубе для выпуска газов в атмосферу закрыта, и газ, пробулькивая через воду, направляется к скрубберу. Другие задвижки

регулируют ход водяного газа сверху и снизу. В период горячего дутья открыта труба в атмосферу, и газы выходят через нее. Давление газа недостаточно для преодоления сопротивления столба воды в затворе.

Если давление газа за затвором больше, чем в генераторе, обратного движения газов не произойдет, так как вода из внешней коробки будет выдавлена в трубу, подводящую газ, на большую высоту.

На этом принципе основано применение гидравлических обратных предохранительных клапанов. При падении давления в подводящем трубопроводе ниже давления в трубопроводе за затвором уровень воды в затворе будет опускаться, а в подводящей трубе — подниматься. Высота затвора в подводящей трубе, уравновешивающая давление газа за затвором, будет расти очень быстро, так как отношение высот подъема воды в подводящем трубопроводе и опускания в затворе обратно пропорционально отношению их площадей сечений, и обратного прохождения газов не произойдет.

Тарельчатые клапаны и плоские шиберы могут служить не только для включения и выключения газа, но и для регулировки количества подаваемого газа путем большего или меньшего открытия их, причем плоские шиберы могут служить лишь для малых давлений, так как являются недостаточно плотными.

Помимо этих затворов в металлических газопроводах для очищенного газа применяются также тарельчатые вентили [1] по типу рис. 131 и задвижки типа водяных «Лудло». В подобных тарельчатых вентилях седло для тарелки создается не поворотом газопровода, а установкой соответствующей перегородки в самом клапане. Что касается задвижек, то в них плотность достигается прижимом клина к щекам клапана с помощью винта с цепным или ручным маховичком. Задвижки снабжают снизу отверстиями, для того чтобы можно было время от времени прощупать рукой задвижку, проверить, насколько плотно закрыто отверстие.

Плотность вентилей и задвижек, применяемых при более высоких давлениях газа, часто обеспечивают путем заполнения водой колен газопроводов, предусматриваемых за вентилями и задвижками. У мест потребления газа (конечные отводы) подвешивают иногда на цепи или тросе заглушки, которыми помимо клапана для надежности при остановках выключают газопроводы.

Клапаны высокого давления

Конструкция задвижки для высокого давления газа представлена на рис. 132. Ее особенностью является наличие вместо одной тарелки двух дисков, из которых каждый после опускания клапана с помощью рычажного или клинового приспособления зажимает соответствующую часть газопровода. Корпус клапана и диски снабжаются сменяемым уплотнением (кольцами).

[1] Разница между вентилем и задвижкой заключается в том, что запорная поверхность у задвижки движется перпендикулярно потоку движущегося газа, а у вентиля — параллельно.

Чтобы избежать просачивания газа в принимающий газопровод в случае неплотности клапана, корпус клапана снабжается вытяжкой, открывающейся при закрывании клапана. Этим предупреждается возможность повышения давления в корпусе клапана, которое может возникнуть в результате пропуска газа диском, замыкающим подающий газопровод.

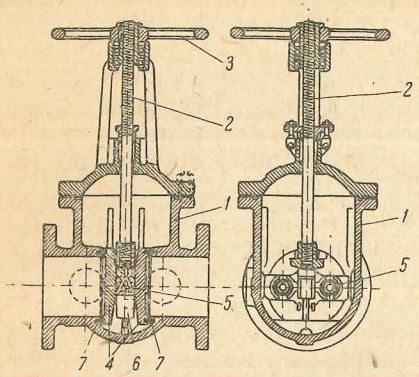


Рис. 132. Клапан высокого давления:
1—корпус клапана, *2* — винт, *3* — маховичок, *4*—диски, *5*—пружины, стягивающие диски, *6*—клин, *7*—уплотняющие кольца

Предохранительные клапаны

Сила взрыва, получающегося в газопроводе при воспламенении образовавшейся в нем взрывчатой смеси, воспринимается преимущественно торцевыми частями газопровода, где и устанавливаются достаточные по размерам предохранительные клапаны, которые вместе с тем служат и для чистки газопроводов и в качестве лазов. Предохранительный клапан должен в случае взрыва открыться, выпустить воспламенившуюся смесь и закрыть при понижении давления отверстие, сообщающее газопровод с атмосферой, во избежание присоса воздуха и возможного повторения взрыва.

При кирпичных газопроводах роль предохранительных клапанов играют шамотные плитки, лежащие на отверстиях для чистки. Ввиду малой прочности открытых кирпичных газопроводов в отношении разрывающих усилий при сильных взрывах с них иногда сбрасывает своды.

В металлических газопроводах чаще всего применяют металлические предохранительные клапаны-хлопушки (рис. 133). Этими же клапанами пользуются при чистке газопроводов для удаления смолы и пыли, для чего их иногда располагают вдоль всего газопровода с промежутками в несколько метров.

Обыкновенно подвижная часть клапана делается настолько тяжелой в нижней кромке, что размах ее при взрыве невелик и после взрыва она в силу своей тяжести садится на место. Если же при больших отверстиях крышка клапана делается более легкой конструкции,

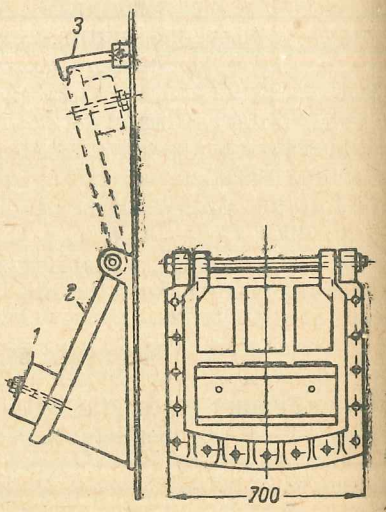


Рис. 133. Предохранительный клапан-хлопушка:
1—груз, *2*—крышка, *3*—скоба, удерживающая клапан в поднятом положении

то необходимо прикрепить к клапану планку, ограничивающую высоту подъема крышки клапана.

Для большей плотности клапана крышка в месте соприкосновения с седлом промазывается глиной.

Иногда применяются клапаны, снабженные крышкой, которая помещается в жолобе и заливается свинцом или замазывается глиной. В случае взрыва подъем крышки с грузом, движущейся по направляющей, ограничивается скобой, прикрепленной к газопроводу.

На рис. 134 показан пружинный предохранительный клапан. При взрыве крышка приподнимается по направляющей и сжимает пружину, которая затем возвращает крышку в исходное положение.

Иногда применяют гидравлические предохранительные клапаны (рис. 129). Роль гидравлического клапана уже упоминалась выше: в нем вода, выплескиваясь при взрыве и быстро принимая горизонтальную поверхность, заменяет откидную крышку. Для того чтобы подобный клапан был вполне безопасен, в нем после взрыва

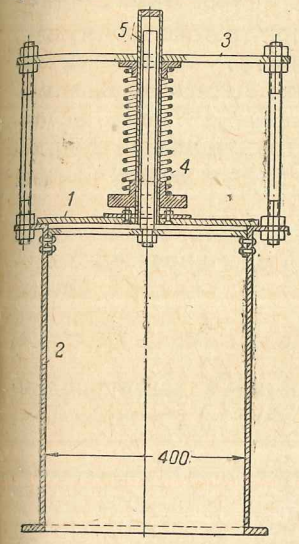


Рис. 134. Пружинный предохранительный клапан:
1—тарелка, *2*—корпус, *3* — упорная пластина, *4*—пружина, *5*—направляющая

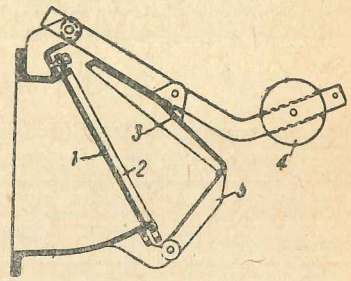


Рис. 135. Предохранительный клапан с металлической пластинкой:
1—металлическая пластинка, *2*—рамка, зажимающая пластинку, *3* — крышка, *4*—груз, *5*—собачка

должно оставаться достаточное количество воды, и приток воды к нему должен обеспечивать затвор. Этому условию отвечает конструкция, представленная на рис. 129: вода из охладителя стекает в гидравлический затвор. Значение обратного клапана (рис. 130) описано выше.

Предохранительные клапаны, служащие в то же время и для чистки газопроводов, всегда ставятся у затворных клапанов, в местах поворотов газопроводов и против выхода газа из генератора.

Предохранительные клапаны устанавливаются также и при наличии регуляторов давления на случай порчи последних, засоса воздуха и взрыва. В установках для холодного и очищенного газа при давлениях больше 100 *мм* вод. ст., чтобы избежать утечки газа через щели, применяют клапаны с алюминиевыми или свинцовыми листами толщиной в 0,3 *мм* (рис. 135). Крышка клапана с грузом в нормаль-

ном состоянии полуоткрыта, для чего между краем крышки и седлом вставляется деревянный брусок или же крышка поддерживается собачкой. При взрыве крышка слегка приподнимается, брусок или собачка падает, и крышка тяжестью груза и своей собственной тяжестью прижимается к седлу и действует как обыкновенный предохранительный клапан до тех пор, пока не переменят лопнувший лист, что может быть сделано на ходу, если лист заложен в специальной рамке, которую можно вынуть.

В газопроводах горячего газа легко разместить достаточные по размеру предохранительные клапаны, умеряющие или уничтожающие силу взрыва, и тем самым избежать при взрыве больших разрушений. В установках же с очисткой газа очистительные устройства — скрубберы, каплеуловители, электрофильтры и аппараты Тейсена — снабдить достаточными по размеру предохранительными клапанами затруднительно. Поэтому для заглушения взрыва целесообразно ставить после газовых вентиляторов предохранительные башни, заполненные коксом, представляющие собой устройство с большой поверхностью соприкосновения с газом, быстро его охлаждающее. Башня снабжается предохранительными клапанами.

Действие кокса аналогично действию сетки Деви, применяемой в рудничном деле для безопасных ламп. Иногда в газопроводах устанавливают и предохранительные сетки.

Клапаны для чистки

Пылеуловители, мешки для пыли и отверстия в газопроводах, предназначенные для осаждения пыли, снабжаются специальными клапанами для удаления пыли.

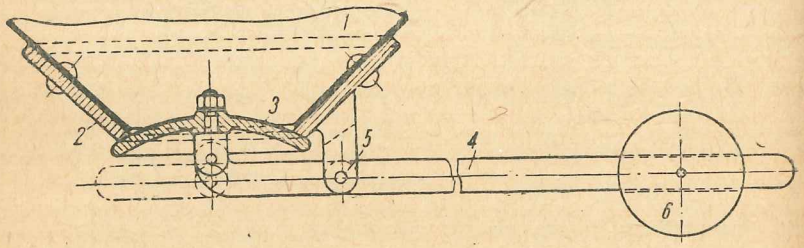


Рис. 136. Клапан пылеуловителя:
1—корпус пылевого мешка, *2*—седло, *3* — тарелка, *4*—рычаг, *5*—ось рычага, *6* — противовес

Клапаны пылеуловителей (рис. 136) снабжаются противовесами и самостоятельно закрывают отверстия. Выбрасывание пыли из пылеуловителей может быть произведено на ходу, так как газ в газопроводе находится под давлением. Сначала из отверстия высыпается столб пыли, потом появляется газ. В этот момент выпускают из рук рычаг, и клапан садится на место. Чтобы пыль не рассеивалась по воздуху, под клапаном пристраивают трубу с расширенной вверху частью, и пыль ссыпается по трубе в подставленную вагонетку.

На рис. 170 представлен гидравлический затвор пылеуловителя, также допускающий очистку последнего на ходу.

Клапаны установок водяного газа

В установках водяного газа применяются различные типы клапанов в зависимости от их назначения.

Для включения и отключения пара применяются клапаны тарельчатого типа, показанные на рис. 139.

Так как в установках водяного газа пар подводится в газогенератор попеременно в верхнюю и нижнюю часть, то для изменения направления движения пара применяются трехходовые клапаны по типу, представленному на рис. 137. Трехходовой клапан устанавливается

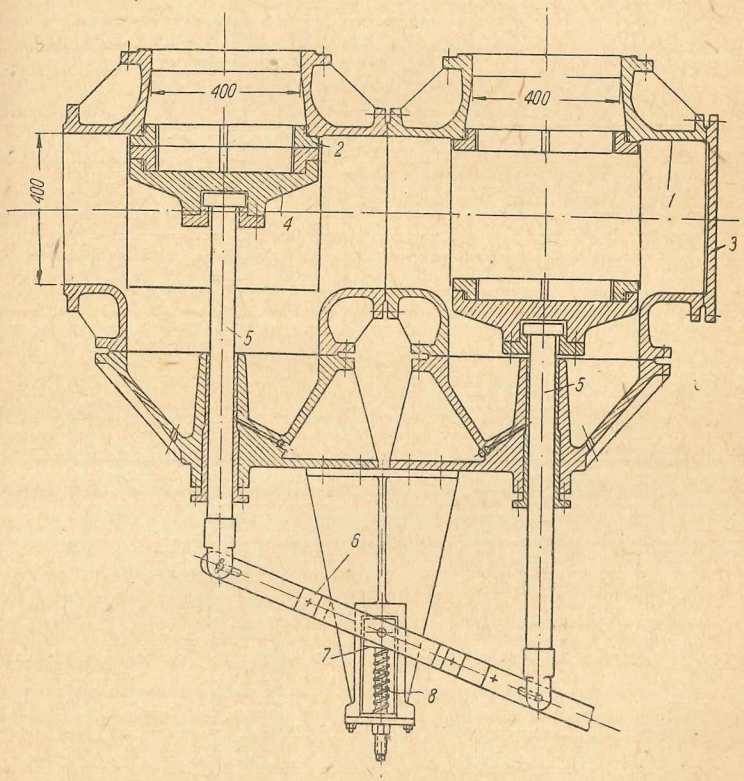


Рис. 137. Паровой трехходовой клапан:
1—корпус клапана, *2*—седло, *3*—крышка, *4*—тарелка, *5*—шпиндель, *6*—рычаг с грузом, *7*—ползун, *8*—пружина

на паропроводе за клапаном, отключающим пар. С помощью груза клапан постоянно находится в положении, направляющем пар снизу вверх. При открытии задвижки газопровода нижнего газа (рис. 95) клапан переставляется.

На дымовой трубе устанавливаются клапаны по типу, изображенному на рис. 138. Клапаны, устанавливаемые на газопроводах, представлены на рис. 139. Клапаны первичного и вторичного воздуха, устанавливаемые на воздухопроводах, аналогичны изоб-

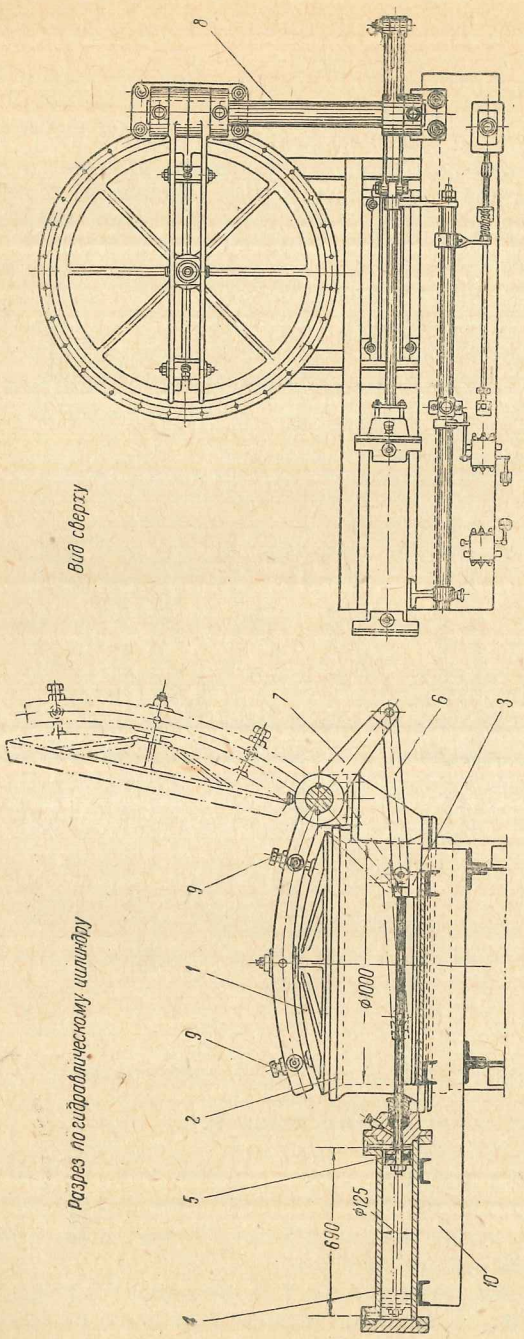


Рис. 138. Клапан дымовой трубы:
1—клапанная тарелка, *2*—седло, *3*—направляющая штока гидропривода, *4*—цилиндр гидропривода, *5*—поршень гидропривода, *6*—тяга, *7*—рычаг, *8*—вал, *9*—установочные болты, *10*—рама клапана

раженному на рис. 139, но отличаются диаметром и качеством материала, из которого они изготовлены.

Клапаны, через которые проходят газы с высокой температурой, называются горячими клапанами. Эти клапаны работают в очень тяжелых условиях. Они регулярно и часто открываются и закрываются, причем пропускают пыльные, горячие и разъедающие газы. Температура клапана при открытом и закрытом положении резко колеблется, что вызывает колеблющиеся термические напряжения в деталях клапана.

При всех указанных тяжелых условиях работы к этим клапанам предъявляются высокие требования в отношении их плотности и безотказности в работе. По этим причинам ответственные детали клапанов изготовляются из специальных жароупорных сталей; корпус иногда снабжают водяным охлаждением, и вся конструкция в целом является значительно усложненной.

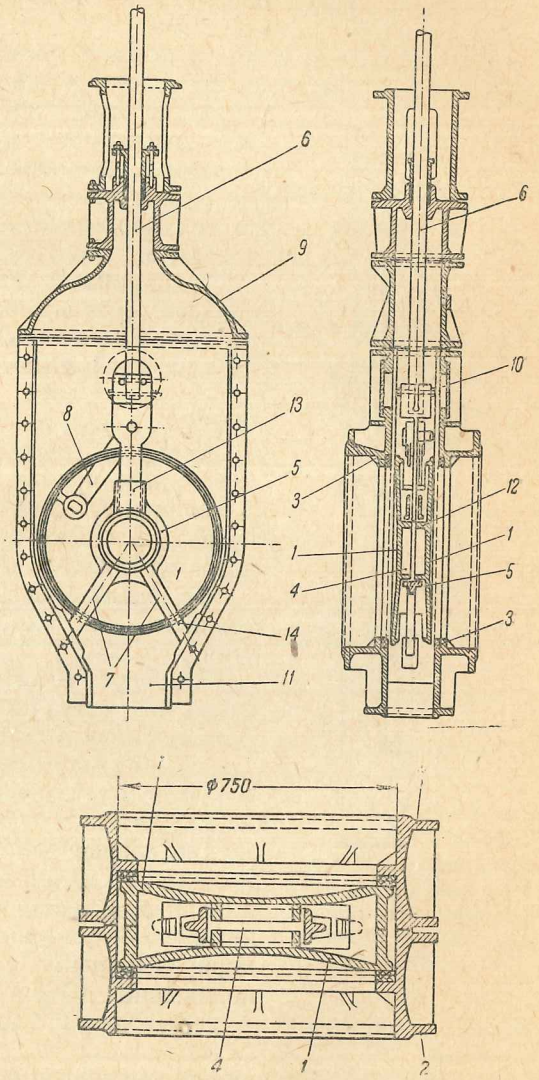


Рис. 139. Клапан горячего газа с двумя уплотняющими дисками

На рис. 139 представлен клапан для горячего газа с двумя уплотняющими дисками. Диски *1* в центральной части снабжены полыми цапфами *4*, входящими в хомут *5*. Диски по краям с наружной стороны имеют кольцевые приливы, которыми прижимаются к седлам *3*, цапфы же *4* снабжены сегментными приливами *12*, края которых очерчены по винтовой линии. При вращении дисков в разные стороны один относительно другого сегментные приливы скользят друг по другу и заставляют диски расходиться и плотно прижиматься

к седлам. Осевое вращение дисков является главным преимуществом клапанов этого типа, так как при развороте они не только плотно прижимаются, но и сами пришлифовываются к седлам, обеспечивая плотность прилегания.

Разворот дисков осуществляется за счет свободного хода конца подвески *13* в головке хомута *5*.

При опускании штока *6* хомут с дисками опускается до тех пор, пока упоры *7* хомута не коснутся приливов *14* на корпусе клапана *2*; движение штока продолжается за счет указанного зазора в головке хомута, и шток, нажимая на тяги *8*, связанные с дисками, заставляет диски разворачиваться и расходиться в стороны до тех пор, пока они плотно не прижмутся к седлам.

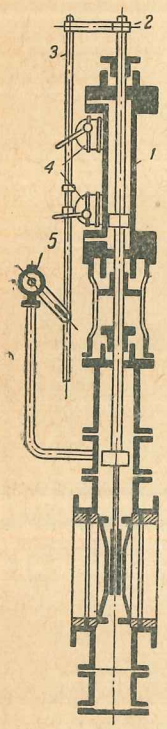


Рис. 140. Схема гидравлического привода клапана горячего газа

Открывание клапана происходит в обратном порядке. При движении штока *6* вверх сначала тяги *8* освобождают диски, заставляя их вращаться в обратном направлении до крайнего положения, затем поднимаются подвески *13*, хомут *5*, тяги *8* и оба диска *1*.

Корпус *2* клапана, изготовляемый из жароупорного чугуна, состоит из двух половин с фланцами, соединяемых болтами. Верхняя крышка *9* также изготовляется из жароупорного чугуна.

Сменяемые седла, диски, хомут и тяги изготовляются из хромоникелевой жароупорной стали.

В корпусе клапана имеется лючок *10* для доступа к месту крепления подвески к концу штока. Снизу в корпусе имеется отверстие *11*, к которому присоединяется или труба, опускаемая в водяной затвор и служащая для удаления пыли и конденсата, или просто герметическая дверца для той же цели.

Клапан имеет маленький вспомогательный клапан *5*, показанный на рис. 140, назначение которого — соединять внутреннее пространство корпуса клапана с атмосферой при закрытом положении дисков и удалять в атмосферу в случае образования неплотностей газы, проникающие в корпус клапана.

Клапан работает при помощи гидропривода, установленного в верхней части и показанного на рис. 140. Гидропривод — обычного типа и состоит из поршня с манжетным уплотнением, движущего в цилиндре *1*. Шток *2* связан с наружным параллельным штоком *3*, на котором расположены пальцы, замыкающие в крайних положениях клапана электрические предельные выключатели *4*.

Эти выключатели связаны со световой сигнализационной панелью, указывающей положение всех клапанов агрегата.

Клапаны и трубы для пуска, продувки и выжига газа

Генераторы для разжига и выпуска газа в атмосферу снабжаются специальными трубами с клапанами. Если этих труб нет, то разжиг производится на загрузочную коробку генератора, и выделяющиеся газы создают тяжелые условия для обслуживающего персонала.

На рис. 141 представлена пусковая труба. Устройству клапана вверху трубы приписывают то преимущество, что при работе генератора труба постоянно заполнена газом, чем предупреждается возможность образования взрывчатой смеси при пуске газа на воздух, тогда как при устройстве по рис. 129 выпускаемый при открытии клапана газ может образовать с находящимся в трубе воздухом взрывчатую смесь. На практике вследствие малого диаметра этих труб и интенсивного вытеснения воздуха газом хлопков не наблюдается.

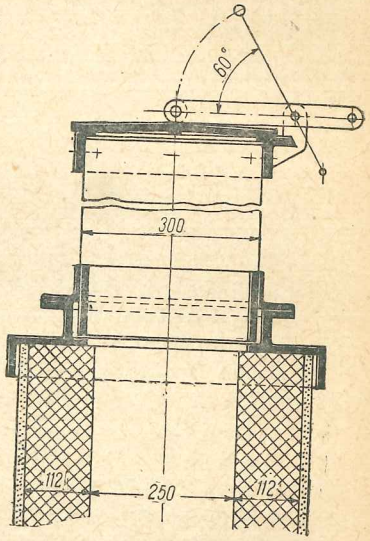


Рис. 141. Пусковая труба

Иногда соединение генератора с пусковой трубой может осуществляться подвижным отрезком трубы, насаживаемым на люк газоотводного штуцера. Неудобством этого устройства является выделение газа при открывании люка, а также присос воздуха через неплотности между насаживаемым отрезком трубы и люком и пусковой трубой, вызывающий в случае высокой температуры газа горение его и накал трубы.

Пусковые или продувные трубы ставят и после очистных устройств и в конце газопроводов для удаления из них при пуске или опорожнении газопровода газа, воздуха и взрывчатой смеси. Для этой же цели газопроводы часто соединяют с дымовой трубой соединительным коленом или газопроводом с клапаном, и выпуск взрывчатой смеси производится путем открывания клапана на трубу.

☆

Глава четвертая

ПОДАЧА ВОЗДУХА И ПАРА В ГАЗОГЕНЕРАТОРЫ

☆

1. ПОДАЧА ВОЗДУХА

Общие соображения

В генераторах, работающих с естественной тягой (самодувно), воздух подается вследствие разности весов столбов холодного наружного воздуха и нагретого газа в генераторе. Эта же сила продвигает газы в самом генераторе и создает вверху его положительное давление, потребное для движения газа в газопроводе (см. гл. II).

Увлажнение воздуха в этом случае достигается устройством бетонного поддувала и заполнением его водой. За счет лучеиспускания решетки, а также отдачи тепла раскаленными частицами золы и шлака, проваливающимися в бетонное поддувало, вода испаряется и примешивается к воздуху, поступающему в генератор. Ввиду ограниченности и незначительности напора, создаваемого самодувными генераторами [1], в случае большого сопротивления слоя топлива или же при необходимости преодолеть какие-либо сопротивления за генератором применяют искусственное дутье.

Искусственным путем воздух подается или пароструйными приборами — инжекторами и паровыми воздуходувками за счет энергии сжатого пара, или вентиляторами, воздуходувками и компрессорами с помощью электрической энергии. Чтобы избежать разрежения в генераторе, газопроводах и очистительных устройствах, обычно воздух подается в генератор под давлением. Количество воздуха, подаваемого в газогенераторы при получении воздушного или смешанного газа из различных топлив, приведено в табл. 68.

Давление дутья под решеткой при получении смешанного газа в генераторах без швельшахты составляет в среднем 100—200 *мм*, в генераторах со швельшахтой — 150—400 *мм* вод. ст. При производстве водяного газа давление воздуха под решеткой доходит до 700—1000 *мм*. В установках с жидким шлакоудалением применяют более высокие давления.

[1] Видно из следующего примера: высота генератора — 4,5 *м*, средняя температура газа в генераторе 650°, воздуха — 0°, объемный вес газа — 1,1 *кг/м*³ и воздуха — 1,29 *кг/м*³; располагаемый напор:

$$4{,}5\left(1{,}29 - \frac{1{,}1 \cdot 273}{650 + 273}\right) = 4{,}3 \text{ кг/м}^2 \text{ (4,3 мм вод. ст.)}$$

При расчете вентиляторов и инжекторов следует учитывать утечку воздуха через неплотности. Основными местами утечек являются соединительные части воздухопровода и колосниковой решетки, кладка под генератором, дверцы и клапаны. Необходимо также учитывать увеличение потерь давления в трубопроводах и генераторе при возрастании производительности генератора.

Инжекторы

Для искусственной подачи воздуха раньше часто устанавливали пароструйные приборы — инжекторы. Иногда они применяются и в настоящее время для установок, работающих без мокрой очистки газа (горячий газ), преимущественно в качестве резерва благодаря надежности своей работы, простоте ухода за ними и независимости от наличия энергии на заводе. Инжектор (Эйнон—Эванса), изображенный на рис. 142, имеет следующее устройство (120). По трубке *1* подается под давлением пар. При выходе из сопла пар приобретает за счет потери своего статического давления значительную скорость, и в результате возникающего в струях, вытекающих из сопел *1* и других, разрежения присасывает (инжектирует) через отверстия *2*, *3*, *4*, *5* и *6* извне воздух, необходимый для газификации. В дальнейшем в трубе-диффузоре *7* скоростной напор паровоздушной смеси частично переходит в статическое положительное давление, которое и служит для преодоления сопротивления слоя топлива в генераторе и создания необходимого положительного давления вверху генератора. Таким образом давление пара дает возможность присосать надлежащее количество воздуха и создать необходимое давление паровоздушной смеси.

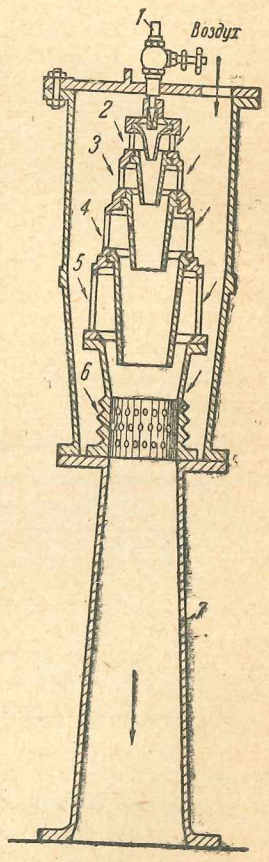


Рис. 142. Инжектор Эйнон-Эванса

При своих достоинствах — надежности, простоте и дешевизне — инжекторы имеют большой недостаток, заключающийся в том, что они не дают возможности установить надлежащее соотношение воздуха и пара, так как при изменении количества подаваемого пара количество подаваемого воздуха меняется непропорционально и кроме того количество пара не может быть ниже необходимого для создания определенного положительного давления. Инжекторы часто вносят в генератор большие количества пара, ухудшающие процесс газификации и состав газа, а также увеличивающие расходы на производство пара. Особой подачи пара в генератор при применении инжекторов обычно не требуется.

При работе на очень влажном топливе подведение инжекторами излишнего пара особенно неблагоприятно отражается на режиме газификации. Недостатком инжекторов является создаваемый ими сильный шум. Инжекторы должны быть снабжены приспособлениями для дросселирования воздуха, чтобы требуемая температура смеси регулировалась независимо от давления струи. Между паровой магистралью и инжектором устанавливается редукционный клапан.

Как более экономичные применяются многосопельные инжекторы, в которых воздух засасывается в нескольких ступенях и паровоздушная смесь в каждой ступени служит для засасывания воздуха в следующую ступень. Сопротивление для прохода воздуха в инжектор и отдельные ступени не должно быть значительным. Устанавливается 4—6 сопел.

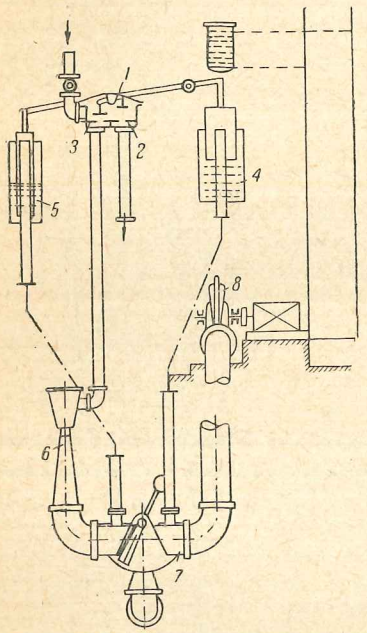


Рис. 143. Приспособление для автоматического включения и выключения инжектора

Иногда паровые наконечники снабжаются регулирующим приспособлением, дающим возможность изменять выходное сечение наконечника в соответствии с нагрузкой инжектора; при отсутствии такой регулировки сопла должны быть достаточно большими, чтобы выпускать количество пара, требуемое для максимальных давления и количества воздуха; в этом случае при уменьшении подачи воздуха и прикрывании парового вентиля (торможение пара) давление пара у выходного отверстия сопла и скорость его вытекания уменьшаются.

Возможно устройство автоматического включения резервного инжектора при выключении тока, питающего дутьевой вентилятор, и наоборот. На рис. 143 представлена схема подобного приспособления фирмы «Петер». Оно снабжено двойным клапаном *1*, состоящим из двух вентилей, из которых вентиль *2* связан с воздухопроводом генератора, а вентиль *3* — с инжектором *6*. Добавляемый к дутью пар протекает через первый вентиль, второй же вентиль закрыт. Клапан связан с колоколами *4* и *5*, погруженными в жидкость и сообщающимися с воздухопроводом *7* и инжектором *6*. Если давление в воздухопроводе упадет ниже давления газа, колокол *4* приходит в движение, переключает клапан *1* и пускает в ход инжектор. При пуске в ход вентилятора *8* клапаны вновь переключаются. Вместо колокола может быть применен электромагнит.

1. Расчет инжекторов. Скорость истечения водяного пара из отверстия наконечника инжектора при постоянном внешнем давлении p_a увеличивается с увеличением давления пара p_i, однако до известного

предела, выше которого скорость остается неизменной. Значение отношения $\frac{p_a}{p_i}$, при котором скорость пара является максимальной, называется критическим; оно составляет для насыщенного пара 0,577 и для перегретого — 0,546. Если величина отношения больше критической, то обыкновенный наконечник дает цилиндрическую струю с наибольшей возможной скоростью истечения. В случае большого давления пара (величина отношения меньше критической) применяют уширяющиеся наконечники — сопла Лаваля, в которых минимальное сечение соответствует скорости пара при критическом давлении, а выходное — максимально возможной скорости истечения.

Площадь наименьшего сечения наконечника f_m в $м^2$ определяется из выражения

$$\frac{G_{сек}}{f_m} = \psi_{max}\sqrt{2g\frac{p_i}{V_i}},$$

где $G_{сек}$ — секундный расход пара в $кг$,
ψ_{max} — величина, равная для сухого насыщенного пара 0,45 и для перегретого — 0,473,
g — ускорение силы тяжести, равное 9,81 $м/сек^2$,
V_i — удельный объем пара в $м^3/кг$,
p_i — начальное давление пара в $кг/м^2$.

Выходное сечение наконечника может быть взято согласно табл. 65.

Таблица 65

Соотношение сечения выходного отверстия и минимального сечения

Пар \ $\frac{p_i}{p_a}$	2	4	6	8	10	20	50	60
Насыщенный	1,015	1,349	1,716	2,069	2,436	3,966	7,980	9,163
Перегретый	1,005	1,258	1,545	1,818	2,075	3,214	5,959	6,761

Угол раскрытия вытекающей струи составляет $\sim 20°$. Расстояние между отдельными соплами и соплом и диффузором не должно быть слишком малым во избежание неполного заполнения сечения сопел и диффузора. Излишне большое расстояние влечет за собой удар о стенки суживающейся части и обратное движение газов. Расстояния между отдельными соплами принимаются равными $1—2d$, где d — диаметр большего сопла или горла. Длина цилиндрического горла диффузора равна 1—2 диаметрам.

Необходимым условием для хорошей работы сопла является достаточно малая величина угла конусности, не превышающая 10°, так как при большей конусности струя отделяется от стенок сопла.

Для подсчета количества или давления потребного пара при заданном количестве воздуха и давлении паровоздушной смеси можно воспользоваться уравнением количества движений масс пара и воздуха, а именно

$$(M + m) \cdot x = \eta m v,$$

где M — масса воздуха, засасываемого в 1 сек.,
m — масса пара, подаваемого в 1 сек.,
x — скорость смеси в *м/сек*,
η — к. п. д. смешения,
v — скорость истечения пара в *м/сек*.

Скорость истечения сухого насыщенного пара может быть определена по формуле:

$$v = \varphi 1680 \cdot p_i^{0,03} \sqrt{1 - \left(\frac{p_a}{p_i}\right)^{0,12}},$$

где φ — коэфициент, колеблющийся от 0,8 до 0,96.

Величина потребного для работы генератора положительного давления увязывается с размерами диффузора, к. п. д. которого может быть принят равным 0,6.

При давлении пара в 4 *ат* (изб.), $\varphi = 0,9$, соотношении пара и воздуха 1 : 6 и $\eta = 0,8$ имеем:

$$v = 0,9 \cdot 1680 \cdot 5^{0,03} \sqrt{1 - \left(\frac{1}{5}\right)^{0,12}} = 650 \text{ м/сек};$$

$$\left(\frac{6}{9,81} + \frac{1}{9,81}\right) x = 0,8 \cdot 650 \frac{1}{9,81};$$

$$x = 74 \text{ м/сек}.$$

Этой скорости должно соответствовать минимальное сечение диффузора.

При расширении сечения диффузора сравнительно с начальным в 3 раза, температуре смеси, равной 60° [1], и объемном весе смеси в 1 *кг/м*³, пренебрегая небольшим количеством сконденсированной влаги, получим:

$$0,6 \frac{M + m}{2} \left(x^2 - \frac{1}{9} x^2\right) = PV,$$

где P — повышение давления смеси в *кг/м*²,
V — объем смеси, составляющий при температуре смеси в 60°:

$$\frac{6 + 1}{1} = 7 \text{ м}^3,$$

откуда

$$P = \frac{0,6 \cdot \frac{6+1}{2} \cdot \frac{8}{9} \cdot 74^2}{7} = 145 \text{ кг/м}^2 \text{ (145 мм вод. ст.)}.$$

[1] Температуру смеси и количество сконденсированного пара получаем из сопоставления прихода и расхода тепла с паром и воздухом.

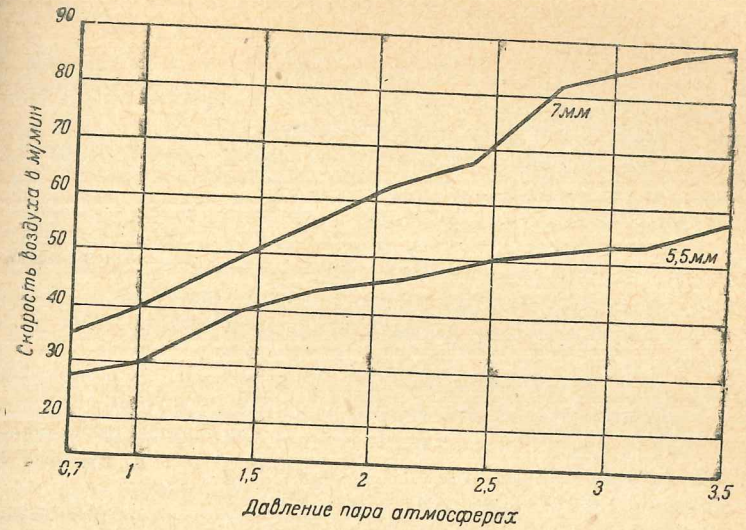


Рис. 144. Характеристика работы инжектора Эйнон-Эванса

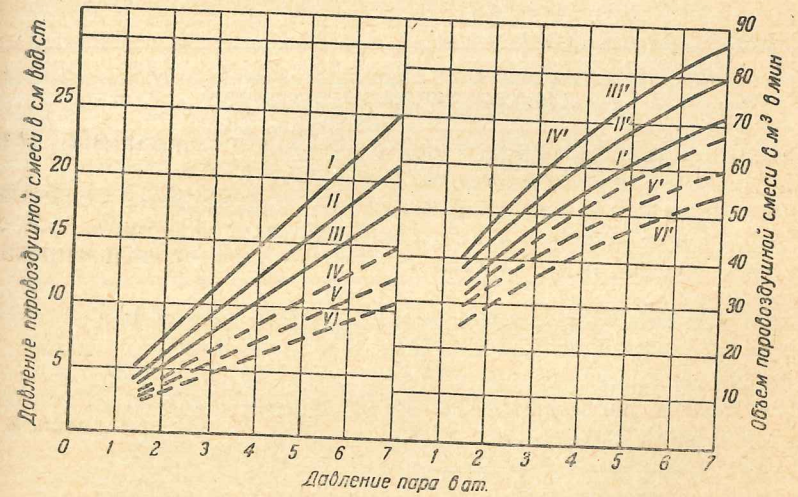


Рис. 145. Характеристика работы инжектора Чапмана:

пунктирные линии—насадок $d = 11$ *мм* с коротким наконечником; сплошные линии—насадок $d = 13$ *мм* с длинным наконечником; кривые *I* и *I'* или *IV* и *IV'*—при 36 открытых отверстиях; кривые *II* и *II'* или *V* и *V'*—при 44 открытых отверстиях; кривые *III* и *III'* или *VI* и *VI'*—при 52 открытых отверстиях. Отверстия диаметром 33 *мм*

2. Практические данные. При работе инжектора [120], подававшего 7,1 $м^3$ воздуха в минуту, давление дутья в зависимости от количества подаваемого пара колебалось следующим образом: при подаче в час 25 *кг* пара давление дутья составляло 51 *мм* вод. ст., при подаче 50 *кг* — 102 *мм*, при 66 *кг* — 152 *мм* и при подаче 100 *кг* — 254 *мм*.

На диаграмме (рис. 144) представлена характеристика работы инжектора Эйнон-Эванса, в котором последнее сопло снабжено мелкими отверстиями для входа воздуха.

Кривые показывают зависимость скоростей воздуха от давления пара при двух размерах наконечников.

Диаграмма показывает (при давлении в 1,8 *ат*), что при увеличении количества пара на 63% (соотношение сечений наконечников) количество воздуха увеличивается только на 26%, и следовательно при необходимости увеличения количества подаваемого воздуха температура насыщения его, а следовательно и содержание влаги увеличиваются.

Диаграмма на рис. 145 показывает влияние изменения давления пара на давление паровоздушной смеси для инжектора Чапмана при двух размерах наконечников и различном открытии воздушных отверстий. Из диаграммы видно, что для увеличения давления паровоздушной смеси при том же давлении пара количество воздуха должно быть уменьшено и что сохранение количества воздуха при повышении давления требует увеличения количества подводимого пара.

По работе инжектора Вельмана, обслуживавшего генератор, работавший на газовом угле, имеются следующие данные: давление пара — 1,5—2 *ат*, давление паровоздушной смеси — 80—100 *мм* и температура смеси 60—70°.

Центробежные вентиляторы

В настоящее время для подачи воздуха в генератор применяют преимущественно центробежные вентиляторы. Эти же вентиляторы применяются и для подачи газа, причем в последнем случае кожух вентилятора снабжается с одной или с двух сторон (по оси) трубами с фланцами для подвода газа и снизу — трубкой для отвода конденсата.

Газ или воздух поступает в эти аппараты в осевом направлении, и при прохождении между лопатками вращающегося колеса они приобретают скоростной напор. Для превращения скоростного напора в статическое давление кожух вокруг наружного края ротора выполняется в виде спирали.

Для условий, существующих в газогенераторных установках, разность давлений у входного и выходного патрубков вентилятора остается неизменной (при тех же удельном весе газа и числе оборотов вентилятора). Эта разность давлений изменяется прямо пропорционально удельному весу газа, и следовательно, если удельный вес газа составляет по отношению к воздуху 0,75, то давление газа при тех же условиях, что и для воздуха, составит $^3/_4$ давления воздуха.

Объем газа, подаваемого вентилятором, прямо пропорционален числу оборотов вентилятора, разность же давлений пропорциональна

квадрату скорости. Расход энергии, затрачиваемой на работу вентилятора, пропорциональный объему и разности давлений, меняется пропорционально третьей степени числа оборотов вентилятора.

Требуемая мощность в л. с. выражается уравнением:

$$N = \frac{V \cdot h}{75 \cdot \eta},$$

где V — секундный объем проходящего воздуха или газа в $м^3$,
h — разность давлений в *мм* вод. ст.,
η — к. п. д., равный для обычных вентиляторов 0,4—0,5.

При этих вентиляторах количество подаваемого воздуха зависит от сопротивления системы. При увеличении этого сопротивления, например при зашлаковании решетки, уменьшается количество подаваемого

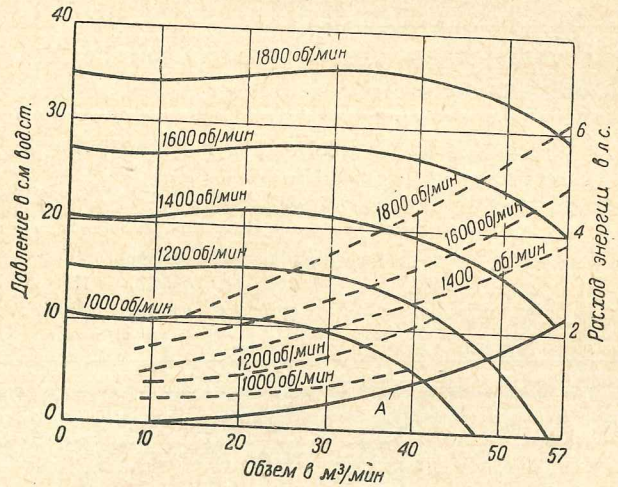


Рис. 146. Характеристика работы газодувки высокого давления

воздуха. При отсутствии запаса давления, ликвидируемого задвижкой, давление и количество дутья могут быть увеличены путем увеличения числа оборотов вентилятора.

Кривые рис. 146 показывают результаты испытаний газодувки высокого давления. Сплошные кривые показывают соотношение между давлением и объемом при различных числах оборотов, а пунктирные — соотношение между расходом энергии и объемом при одном и том же числе оборотов [120].

Сплошная кривая *A* дает скоростной напор газа при выходе его из вентилятора. Этот напор в случае установки конической расширяющейся трубы — диффузора может быть частично превращен в статическое давление.

При необходимости получения высоких давлений прибегают к установке многоступенчатых вентиляторов или же применяют ротационные вентиляторы и компрессоры.

Многоступенчатые вентиляторы (турбовоздуходувки) снабжаются двумя или большим количеством рабочих колес, установленных в ряд таким образом, что воздух из диффузора одного колеса поступает в середину другого колеса.

Воздух из первого колеса с большой скоростью попадает в диффузор, в котором скоростной напор переходит в статический, затем в следующее колесо и т. д. Чем больше колес, тем больше получаемое давление. Воздух может подводиться с одной или с обеих сторон. К. п. д. подобной турбовоздуходувки — 50—65% (поршневой — больше). Эти турбовоздуходувки очень чувствительны к колебаниям давления и загрязнениям. С уменьшением сопротивления они подают значительно большее количество воздуха, и наоборот.

Турбовоздуходувки для давления до 2,5 *ат* делают без промежуточного охлаждения. Работа их при температуре выхода воздуха в 180—200° С вполне надежна. Привод турбовоздуходувок — или от мотора или от паровой турбины.

Подобные турбовоздуходувки применяются и для транспорта газа при давлениях до 8—10 *ат*.

Ротационные вентиляторы и компрессоры

Для подачи малых количеств воздуха (и газа) под значительным давлением применяют ротационные вентиляторы и компрессоры, в которых поверхности, ограничивающие выделяемый объем воздуха, соприкасаются с внутренней поверхностью стенки кожуха.

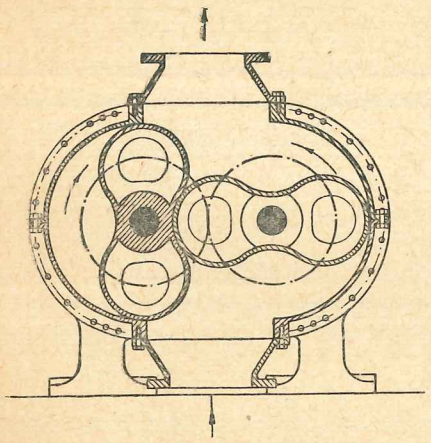


Рис. 147. Ротационный вентилятор Рута

1. Вентиляторы Рута. Ротационные вентиляторы и компрессоры Рута изготовляются для давлений от 750 до 3000 *мм* вод. ст. Они состоят из чугунного корпуса продолговатой формы, внутри которого вращаются в противоположных направлениях два фасонных крыла-колеса, заклиненных на валах (рис. 147). Оба колеса — одинаковой формы, возможно точно пригнаны, и поверхности их соприкасаются с внутренней поверхностью стен корпуса.

Поверхности колес и корпус обработаны. Валы обоих колес имеют опоры на торцовых стенках кожуха и связаны снаружи с помощью зубчатой передачи, помещенной в масляной ванне. Один из валов удлинен и снабжен шкивом для привода.

Подобные вентиляторы обычно имеют небольшое число оборотов; при длительной их работе рекомендуется снизить число оборотов до $^2/_3$ номинального, при этом к. п. д. ротационных вентиляторов составляет 60—70%.

Эти вентиляторы подают неизменное количество воздуха независимо от сопротивления системы или слоя топлива, т. е. при увеличении сопротивления растет давление дутья. Данные о них приведены в табл. 66.

Таблица 66

Размеры вентиляторов Рута

Данные	Фабричный номер							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Производительность (в $м^3/мин$)	8,5	18	30	44	62	92	132	210
Число оборотов в мин.	500	500	400	350	325	330	330	220
Диаметры всасывающей и нагнетательной труб (в *мм*) . .	90	125	160	200	250	300	360	450

Рис. 148 дает представление о зависимости между давлением дутья, потреблением энергии и к. п. д. ротационного вентилятора. Объемный к. п. д. его составляет 75—95%.

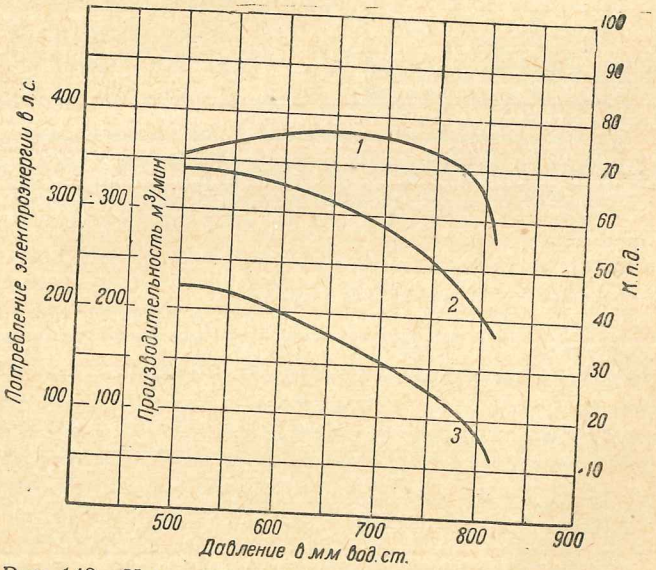


Рис. 148. Характеристика работы вентилятора Рута:
1—к. п. д., *2*—потребление электроэнергии в л. с., *3*—количество воздуха в $м^3/сек$

Вследствие неизменности количества подаваемого вентилятором Рута воздуха регулирование количества дросселированием бесполезно. Изменение количества подаваемого воздуха и потребления энергии может быть достигнуто изменением числа оборотов вентилятора.

При уменьшении расхода воздуха (или газа) давление воздуха увеличивается, что может иметь нежелательные последствия. Поэтому вблизи нагнетательного патрубка предусматривают предохранительные клапаны для выпуска воздуха. Вентиляторы снабжают также обводными байпассами, перепускающими воздух при уменьшении расхода его из напорного патрубка во всасывающий.

2. Вентиляторы с пластинами. В цилиндрическом, обработанном изнутри корпусе *3* ротационного вентилятора (рис. 149) с пластинами *6* (до 4) установлен цилиндрический чугунный вращающийся барабан *5*, служащий для разобщения сторон всасывания и нагнетания (*1* и *2*). В середине корпуса *3* расположен неподвижный вал *4*, закрепленный в торцевой стенке, противоположной расположению привода барабана. На валу *4* насажены пластины *6*, могущие вра-

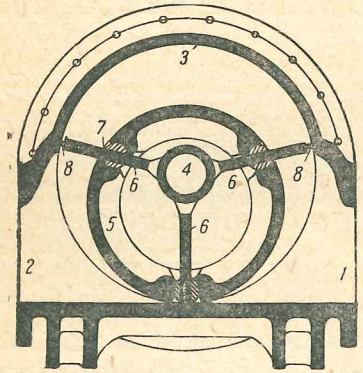


Рис. 149. Вентилятор с пластинками

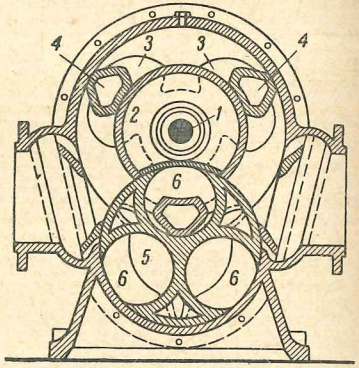


Рис. 150. Вентилятор с вращающимися поршнями

щаться вокруг него. Каждая пластина проходит через прорезь в шарнире *7*, укрепленном в стенке барабана. Пластины легко перемещаются в шарнирах и при всех положениях плотно прилегают к внутренней поверхности цилиндрического корпуса *3*. При вращении барабана *5* объемы камер, образуемые пластинами, сначала увеличиваются; при этом они засасывают газ из всасывающего патрубка. Когда при вращении барабана пластина выключает камеру, начинается уменьшение объема камеры и сжатие, продолжающиеся до сообщения камеры с нагнетательным патрубком. Края пластин прорезаны и в прорезах помещаются планки *8*, прижимаемые пружинками к стенкам корпуса.

В этих аппаратах число оборотов точно соответствует количеству воздуха. Регулировка происходит с помощью байпассов. Вследствие плотного прижима планок к корпусу требуется постоянная обильная смазка поверхности кожуха. Число оборотов вентилятора незначительно (80—130); расход энергии и износ невелики; величина достигаемого давления значительна; начальная стоимость и расходы на смазку больше, чем в других конструкциях.

3. Вентиляторы с вращающимися поршнями. В последнее время находят применение и вентиляторы с вращающимися поршнями. На рис. 150 представлена подобная конструкция Энке. В овальном, суженном книзу корпусе вентилятора расположен вращающийся вал *1*, проходящий через неподвижный, имеющий внизу вырез чугунный барабан *2*. На обоих концах вала внутри корпуса заклинены фасонные пластины *3*, несущие 3 или 4 параллельные валу *1* ребра *4*. Ребра вместе с пластинами *3* вращаются в кольцевом пространстве между барабаном *2* и корпусом вентилятора.

В нижней части аппарата на валу, проходящем через стенку, укреплен барабан *5*. Вал *1* и вал барабана *5* связаны между собой двумя зубчатыми колесами со стороны, противоположной приводу. Барабан *5* снабжен тремя цилиндрическими вырезами. Назначение барабана — отделить в нижней части корпуса пространство всасывания и нагнетания. После прохождения пространства нагнетания ребро *4* попадает в выемку *6* барабана *5*, где между ребром *4* и телом барабана имеется зазор. Вырез в верхнем барабане *2* соответствует положению сегмента нижнего барабана.

Потеря газа через зазор очень незначительна. Нагрузка зубчатых колес невелика; рабочим является только верхний вал.

Производительность подобного вентилятора регулируется, как и других ротационных вентиляторов, с помощью обводных газопроводов или изменением числа оборотов.

Создаваемое вентиляторами Энке давление — 400—3000 *мм*; объемный к. п. д. при давлении на выходе в 500 *мм* — 0,93—0,95, при давлении в 2000 *мм* — 0,82—0,83 и при давлении в 3000 *мм* — 0,60—0,70.

В табл. 67 приведены данные о размерах вентиляторов Энке. К. п. д. ротационных вентиляторов составляет 75—80%. Затрата энергии может быть определена по формулам для поршневых компрессоров (см. гл. III).

Привод вентиляторов

Обычно дутьевые приспособления приводятся во вращение мотором. Во избежание больших потерь вследствие дросселирования при нормальной или неполной нагрузке желательно предусматривать регулирование числа оборотов мотора. При моторах постоянного тока регулирование числа оборотов возможно. При переменном токе от этого приходится отказываться.

Можно изменять число оборотов при соединении вентиляторов с мотором ременной передачей путем смены шкивов. Однако применение ременной передачи вызывает сравнительно быстрый износ подшипников вентиляторов.

Следует обращать внимание на экономичность работы воздуходувки в пределах регулирования и устанавливать характеристики работы их при различных давлениях и количествах воздуха.

Иногда в целях большей экономичности, удобства регулирования и большей независимости от наличия энергии применяют привод вентилятора от паровой турбины с использованием мятого пара тур-

Размеры венти

ляторов Энке

Таблица 67

Данные	Фабричный номер						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Производительность (в $м^3/мин$)	3—4	6—8	9—12	12—15	15—18	18—21	24—48	34—36	40—45	60—120	85—160	125—240
Число оборотов в минуту .	220—250	210—240	200—220	109—210	175—200	175—200	160—180	155—175	150—170	150—240	150—240	150—240
Диаметр всасывающей и нагнетательной труб (в *мм*)	150	175	200	250	275	300	325	350	375	400	450	500

бины для увлажнения дутья. Привод от турбины дает возможность экономной регулировки числа оборотов при меняющейся нагрузке. При этом предусматривается возможность дополнительной подачи острого пара со стороны или же установки резервного мотора.

Преимущества подобного устройства сравнительно с инжекторами видны из следующего сравнения. Инжекторы расходуют при хорошем обслуживании, давлении пара в 8 *ат* и требуемом давлении дутья в 300 *мм* вод. ст. примерно 170 *г* пара на 1 $м^3$ воздуха, расход же пара с давлением в 2,5 *ат* на приведение в движение вентилятора, подающего в 1 мин. 100 $м^3$ воздуха с давлением в 400 *мм* вод. ст., составляет 80—120 *г* на 1 $м^3$ (25—35 *кг* на 1 л. с./час) [146].

Конструкция и оборудование воздухопроводов

Воздухопроводы обычно делают сварными из железа в 3 *мм* толщиной с соединениями на фланцах (при больших давлениях — из более толстого железа). Скорости в них принимают порядка 6—12 *м/сек*.

По германским данным, скорость не должна превышать в ответвлениях 10 *м/сек* и в главном трубопроводе — 10—15 *м/сек*.

Исследования показывают, что наибольшими являются местные сопротивления, причем сопротивления от трения не имеют особого значения; поэтому нужно обращать внимание на форму колен и ответвлений. Колена должны иметь радиус по меньшей мере равный двум диаметрам. Угол между ответвлениями не должен превышать 35°.

В ответвлениях желательно принимать те же скорости, что и в главном воздухопроводе, во избежание потерь от ударов, причем ответвлению в дальнейшем может быть придана расширяющаяся форма для перехода к меньшей скорости (4—6 *м/сек*) ввиду большого количества фасонных частей. Применением диффузора можно использовать 80% освобождающегося напора.

Воздухопроводы подогретого воздуха для генераторов с выпуском жидкого шлака в случае высокой температуры воздуха снабжают футеровкой толщиной в 60—125 *мм* и изоляцией. Скорость подогретого воздуха принимают в пределах 30—45 *м/сек*. Задвижки и фурмы применяют с водяным охлаждением. Воздухопроводы снабжаются задвижками или тарельчатыми клапанами и, если требуется только регулировка количества, — дроссельными клапанами (рис. 151).

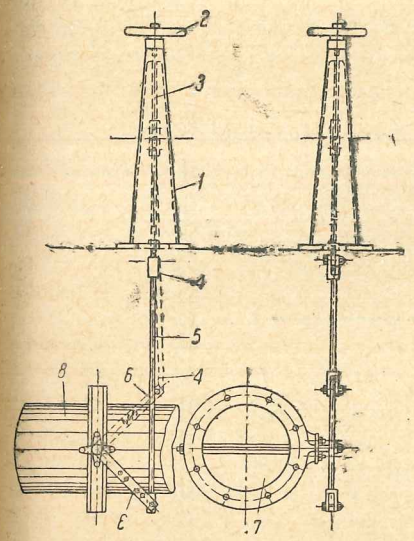


Рис. 151. Дроссельный клапан:
1—колонка, *2*—маховичок, *3*—винт, *4*—шарнир, *5*—тяга, *6*—рычаг, *7*—дроссель, *8*—воздухопровод

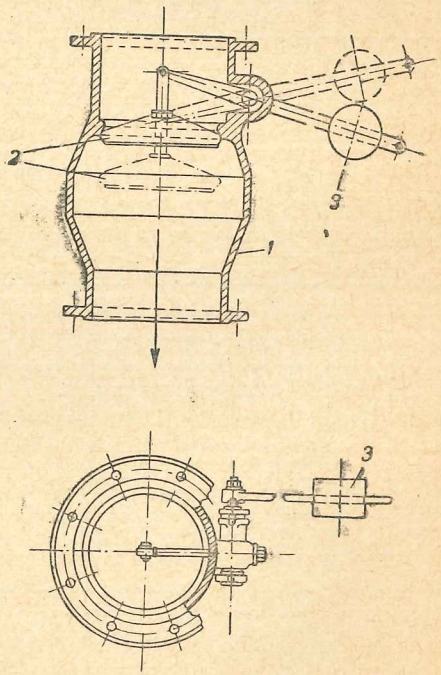


Рис. 152. Обратный клапан:
1—корпус клапана, *2*—конус клапана, *3*—противовес

Для предохранения от проникания газа в воздухопровод при падении давления воздуха, на ответвлениях от воздушной магистрали к отдельным генераторам ставят предохранительные обратные клапаны (рис. 152). В случае внезапного падения давления в воздухопроводе вследствие остановки вентилятора клапан закрывается и предотвращает попадание газа в воздухопровод.

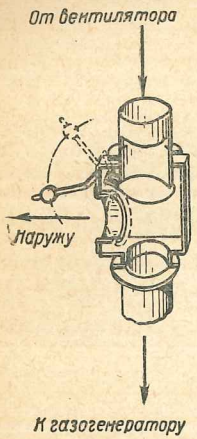


Рис. 153. Обратный клапан

Иногда применяют предохранительные обратные клапаны конструкции, изображенной на рис. 153. При понижении давления воздуха клапан выключает воздухопровод и соединяет генератор с атмосферой. Таким образом избегается возможность попадания в воздухопровод газа, и кроме того воздух может подаваться в генератор из атмосферы благодаря самотяге генератора.

Более надежным, но требующим постоянной затраты большего напора, является применение обратных клапанов с барботерами (см. гл. III).

Давление газа в сети обычно регулируется путем установки на воздухопроводе автоматического регулятора с дросселем, получающего импульс из газопровода.

Иногда при выключении газового и воздушного вентиляторов (прекращение подачи тока) вследствие неудовлетворительной работы обратных клапанов происходит попадание в воздухопровод газа из генератора и смешение его с воздухом. Полученная смесь при поступлении в генератор может взорваться и разрушить воздухопровод. Во избежание этого в подобных случаях воздухопровод продувают. Воздухопровод снабжают продувными трубами, расположенными на концах, и предохранительными клапанами на торцах. Иногда отдельные отрезки воздухопровода (у дутьевых коробок) изготовляют из прорезиненной ткани, разрывающейся при взрыве, что предохраняет остальные части воздухопровода от разрушения. Воздушные коробки под решетками, если они не имеют гидравлического затвора, также снабжают предохранительными клапанами.

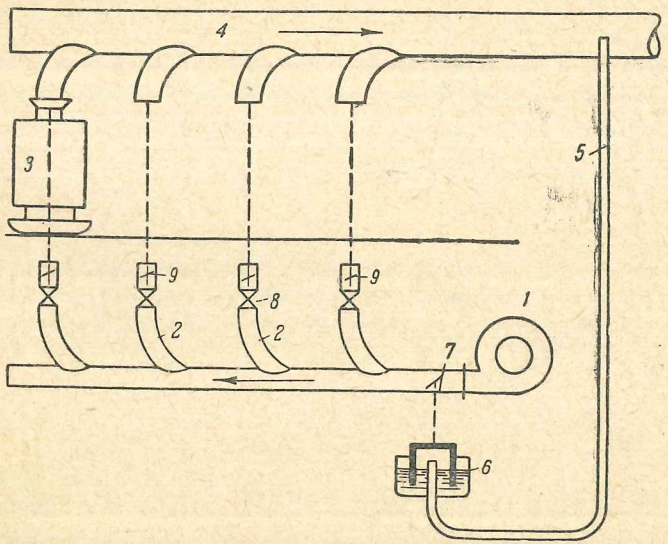


Рис. 154. Схема установки вентилятора, регулятора давления, дросселя и задвижки:

1—воздушный вентилятор, *2*—ответвление к генератору, 3—генератор, *4*—газопровод, *5*—импульсный газопровод, *6* –автоматический регулятор, *7*—дроссель, приводимый в движение автоматическим регулятором, *8*—задвижка, *9*—дроссель

Схема установки вентилятора, регулятора давления, дросселей и задвижек представлена на рис. 154. При падении или повышении давления в газопроводе к потребителю в результате изменения отдачи газа, автоматически (или вручную) поворотом дросселя изменяется давление, а следовательно и количество поступающего воздуха ко всем генераторам. Изменение подачи воздуха к отдельным генераторам для регулирования их режима производится обычно вручную с помощью дросселей. Изменение количества воздуха, подаваемого в общий воздухопровод, может производиться также регулированием парового клапана турбины или инжектора или же регулированием числа оборотов электромотора вентилятора.

2. ПОДОГРЕВ ВОЗДУХА

Подогрев воздуха, вводимого в генератор, применяется особенно часто для генераторов, работающих с выпуском жидкого шлака.

Для подогрева воздуха служат два типа аппаратов: регенераторы и рекуператоры.

В регенераторах насадка (обычно из шамотного кирпича) в один период — прохождения через нее горячих газов — аккумулирует тепло, которое она отдает во второй период воздуху, проходящему через нее. Эти аппараты таким образом характеризуются аккумулированием тепла и периодической переменой режима.

В рекуператорах тепло непрерывно передается через стенку от горячих охлаждающихся газов нагревающемуся воздуху. Эти аппараты работают с постоянным, неизменным режимом.

Рекуператоры изготовляются металлические и из огнеупорного материала. В рекуператорах, изготовленных из обычных железа и чугуна, можно подогреть воздух до температуры не выше 300—400°; рекуператоры из специальных жароупорных металлов и шамотные рекуператоры дают возможность повысить подогрев до 1000°.

Недостатком керамических рекуператоров являются образование в них трещин и расхождение швов, а также громоздкость, связанная с малой теплопроводностью огнеупорных материалов (шамота).

В отношении компактности и неизменности режима наиболее целесообразными аппаратами являются металлические рекуператоры, применяющиеся в виде пластинчатых и трубчатых конструкций. Однако высокая стоимость жароупорных металлов заставляет в случае необходимости подогрева воздуха до высокой температуры применять регенеративные подогреватели.

В качестве большого воздухоподогревателя регенеративного типа может быть применен каупер, представляющий собой большой высоты башню с насадкой, снабженную железным кожухом, футеровкой и теплоизоляцией. Продукты горения специально сжигаемого газа поступают в подсводовое пространство каупера с помощью канала-дымохода, образуемого насадкой, опускаются по насадке, отдавая ей тепло, и отводятся снизу в дымовую трубу или вытяжку. В период дутья воздух вводится в аппарат снизу и поднимается по насадке, подогреваясь за счет тепла, аккумулированного насадкой.

На случай выключения одного из регенеративных аппаратов или увеличения продолжительности газового периода сравнительно с воздушным (или наоборот) устанавливаются три воздухоподогревателя.

К. п. д. регенеративного подогревателя зависит от температуры отходящих газов и составляет примерно 65—75%. Потеря в окружающую среду воздухоподогревателем принимается равной примерно 5—10%.

3. ПОЛУЧЕНИЕ И ПОДАЧА ПАРА ДЛЯ ГАЗИФИКАЦИИ

Общие соображения о получении и потреблении пара

Пар в газогенераторных установках расходуется для подачи в генератор, для завес шуровочных и загрузочных затворов, для обогрева смоляных резервуаров и лотков, для отопления, для приведения в движение паровых турбин и машин (воздуходувок, газодувок и пр.), для инжекторов, для продувки газопроводов и скрубберов и т. д.

В газогенераторных установках может применяться и получаться как перегретый, так и насыщенный пар. Неудобством применения насыщенного пара является его конденсация в трубопроводах. Применение перегретого пара выгодно в отношении увеличения полезной разности температур при его использовании для силовых нужд (температура 300° и больше) или для целей отопления.

Количество получаемого в одинаковых условиях перегретого водяного пара меньше, чем насыщенного, что уменьшает выгодность получения перегретого пара.

При получении пара в генераторных установках различают низкое, среднее и высокое давление, под которым понимают давление соответственно до 0,5, от 0,5 до 5 и от 5 *ат* и выше.

Нижний предел давления пара ограничен условиями применения: для силовых нужд требуется 8—10 *ат*, для отопления и питания генераторов смешанного газа достаточно низкого давления, для питания генераторов водяного газа применяется пар с давлением в 1—2 *ат*.

В наиболее простом случае получение пара осуществляется в отдельной котельной установке. Так как подобное устройство связано с расходом топлива на получение пара и денежными затратами на сооружение и содержание котельной, имеется целый ряд конструкций, предусматривающих получение пара в охлаждающих кожухах и крышках и в котлах-утилизаторах за счет использования физического

тепла генераторного газа или продуктов горячего дутья генераторов водяного газа.

Имеются также конструкции, в которых пар получается за счет тепла горячей воды или горячего воздуха.

Некоторое количество водяного пара в генераторах, снабженных гидравлическими затворами вращающихся чаш, может испаряться из затворов. Обычно это количество водяного пари не велко. Однако в случае понижения уровня золы в генераторе и при повышении зольности топлива из чаши будет испаряться значительное количество влаги.

В установках смешанного газа одной из основных статей расхода пара является расход его на дутье.

На практике обычно в генераторах смешанного газа применяется паровоздушное дутье, содержащее некоторое количество влаги. Контроль влагосодержания в этом случае производится путем измерения температуры смеси.

При данной температуре парциальное давление водяного пара в насыщенной смеси остается постоянным, независимо от общего давления, т. е. при постоянной температуре отношение количеств пара и воздуха изменяется обратно пропорционально общему давлению смеси. Содержание влаги в дутье в зависимости от температуры насыщения приведено в табл. 80.

Перегрев паровоздушной смеси может происходить или из-за дополнительного ее подогрева вследствие подачи сильно перегретого пара, или же при пропуске сухого пара высокого давления через дроссель.

При наличии подобных условий для возможности контроля влажности дутья измерением температуры рекомендуется подведение влажного пара для поглощения излишка тепла.

Ввиду большого влияния влажности паровоздушной смеси на режим газификации рекомендуется влажность регулировать автоматически, что производится с помощью термостатов.

Обычно пар для увлажнения дутья подводят к отдельным воздушным ветвям, что дает возможность регулировать подачу пара в отдельные генераторы в зависимости от их состояния и режима. Смешение пара с воздухом производят на достаточном расстоянии от генератора, чтобы смесь была равномерна, путем ввода внутрь воздухопровода паровой трубки в виде расширяющегося сопла или винтовой вставки.

Худшие результаты дает подвод пара непосредственно под колосники. Кроме того в этом случае контроль добавки пара путем измерения температуры паровоздушной смеси невозможен.

Данные о расходе пара на увлажнение дутья при различных топливах в генераторах смешанного газа приведены в табл. 68.

Расход пара, превышающий 40% от веса нелетучего углерода топлива, обычно вызывается шлакованием. Расход пара на паровые завесы шуровочных и загрузочных отверстий изменяется в зависимости от степени спекания и шлакования топлива; ориентировочно можно принять его до 15% от веса топлива, пересчитанного на условное.

Расход пара с давлением в 8 *ат* на инжекторы, применяемые иногда в качестве резерва, составляет при давлении дутья в 200,

Таблица 68

Выход и теплотворная способность газа, расход пара и первичного воздуха при газификации различных топлив

Род топлива	Расход		Выход газа (в $м^3/кг$)		Теплотворная способность газа (в $кал/м^3$)				Температура газа (в °С)
					сухого		влажного		
	пара (в $кг/кг$)	воздуха (в $м^3/кг$)	сухого	влажного	высшая	низшая	высшая	низшая	
Дрова	0—0,1	0,7—1,2	1,0—1,7	1,7—2,2	1350—1600	1300—1500	850—1300	800—1200	80—300
Торф	0,1—0,2	0,7—1,2	1,2—1,7	1,8—2,2	1250—1700	1200—1600	800—1350	750—1250	80—300
Бурый уголь	0,1—0,4	0,7—1,5	1,4—2,4	2,0—3,0	1200—1700	1150—1600	800—1400	750—1350	70—400
Каменный уголь	0,2—0,4	1,5—2,6	2,3—3,8	2,7—4,2	1300—1500	1200—1400	1150—1400	1000—1350	500—800
Антрацит	0,3—0,6	2,6—3,2	3,8—4,4	4,0—4,7	1200—1300	1150—1250	1100—1250	1050—1200	350—650
Кокс	0,3—0,6	2,6—3,2	3,8—4,4	4,0—4,7	1200—1300	1150—1250	1100—1250	1050—1200	350—650

300 и 400 *мм* вод. ст. соответственно примерно 0,35, 0,41 и 0,58 *кг* на 1 *кг* каменного угля [153]. Расход пара на прогрев смолы, пропарку газопровода, отопление и т. д. определяется в зависимости от характера станции.

Расход пара на дутье в установках водяного газа составляет примерно 1—1,5 *кг* на 1 *кг* углерода в топливе или 0,5—0,8 *кг* на 1 $м^3$ газа.

Котлы-утилизаторы в установках смешанного газа

Газогенераторы смешанного газа снабжаются обычно индивидуальными котлами-утилизаторами, что делает работу установок независимой от засорения каналов. В случае установки одного котла для нескольких газогенераторов засорение общего соединительного газопровода до котла вызывает необходимость выключения группы генераторов.

Верхний предел давления пара, получаемого в котле-утилизаторе, ограничивается конструкцией котла (дымогарные — до 15 *ат*, водотрубные — выше) и температурой газов. При низких температурах целесообразно получать пар низкого давления. Если принять, что температура газов составляет при входе в котел 450° и при выходе величину, на 100° бо́льшую температуры пара, то получим полезный перепад равным:

При 5 *ат*: $450 - (160 + 100) = 190°$.
» 15 » $450 - (200 + 100) = 150°$.

Таково же соотношение между количествами получаемого пара.

Преимущественное распространение в качестве котлов-утилизаторов имеют дымогарные котлы с одним ходом газов, с цельнотянутыми трубами диаметром в 54—100 *мм*. Они легко очищаются, плотны, допускают применение больших скоростей, удобны в монтаже, компактны. При больших давлениях (больше 15 *ат*) их заменяют водотрубными котлами. Преимуществом последних является их меньшее сопротивление.

Для очистки котлов с дымогарными трубами от накипи и осадков пучки труб делают выдвижными и предусматривают лючки у отдельных труб.

Чистка водотрубных котлов затруднительнее.

Физическое тепло генераторного газа используется в котлах при топливах, не содержащих смол и дающих горячий газ, теплосодержание которого составляет 8—12% от теплотворной способности топлива. Газ пропускают через вертикальные трубчатые котлы, в которых полезно используется 40—50% указанного тепла.

Согласно данным по котлам-утилизаторам в печных установках, установка паровых котлов-утилизаторов рентабельна лишь в случае достаточно высокой температуры газа (больше 400°). Расчеты указывают на невыгодность охлаждения газов ниже 250—275°.

В трубчатых котлах получают иногда также горячую воду. В последнем случае дутьевой воздух может быть увлажнен путем пропускания его над горячей водой.

На рис. 184 представлен внешний вид котла коксового генератора Пинча. Газ, пройдя пылеуловитель, входит в котел сверху и проходит по трубкам, завальцованным в решетчатые днища, направляясь далее в скруббер для окончательного охлаждения и очистки.

Вода в котел подводится снизу, и излишнее количество ее сливается в отводную трубку сверху. Проходящий вверху котла над водой воздух увлажняется получающимся паром и направляется по воздухопроводу к генератору.

В нижней части котел снабжен водяным затвором, служащим для сбора пыли, и предохранительным клапаном.

В результате испытания генератора [154], снабженного подобным котлом (Часов-ярский завод), получены следующие данные: расход коксика — 633 *кг/час*; испарено в котле воды — 164 *кг/час*; температура газа при выходе из генератора 415°; температура газа у скруббера (за котлом) 125°; выход

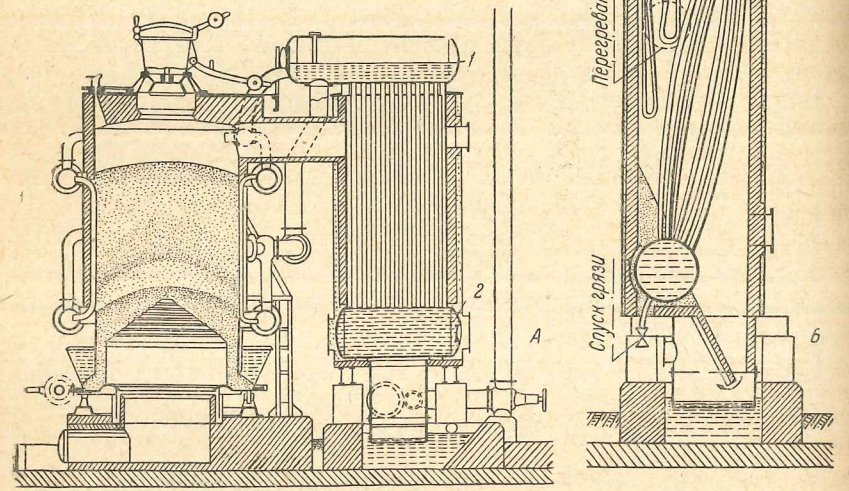


Рис. 155. Водотрубный котел-утилизатор:

А—общий вид, *Б*—разрез по котлу; *1*—верхний барабан, *2*—нижний барабан

газа — 4,2 *м*³ на 1 *кг* коксика; температура воды, поступающей в котел, 16°; температура воздуха 21°; количество сухого воздуха (0°, 760 *мм* вод. ст.) — 1640 *м*³/*час*; температура паровоздушной смеси при выходе из котла 76°; температура воды, вылившейся из испарителя, 99° и количество последней — 80 *кг/час*. Поверхность нагрева котла — 44 *м*²; диаметр труб — 100 *мм* и длина — 2,5 *м*; сопротивление котла — 5—10 *мм* вод. ст.

По генераторам диаметром в 2,6 *м*, работающим на коксе и снабженным котлами-утилизаторами, имеются следующие данные: производительность генератора — 18,4 *т/сутки*; выход газа — 4,06 *м*³/*кг*; температура газа при выходе из генератора 513°; температура при выходе из котла 218°; количество получаемого пара — 1,13 *кг* на

1 *кг* кокса; давление пара — 5 *ат* (изб.); температура питательной воды 41°; полезно использованное тепло в рубашке и котле составляет 11% от теплотворной способности топлива; охлаждающий кожух и котел соединены в одну систему, снабженную хорошей изоляцией.

В газогенераторах Кертинга диаметром в 2,6 *м*, снабженных котлами-утилизаторами, при производительности генератора в сутки в 13,9 *т* АМ и выходе сухого газа в 3,72 *м*³/*кг* температура газа составляла при выходе из генератора 535°, до котла 427° и при выходе из котла 187°. Котлы имеют поверхность нагрева, равную 100 *м*², и предназначены для получения пара с давлением в 12 *ат*.

Съем пара с 1 *м*² поверхности нагрева котла-утилизатора, обслуживающего генератор смешанного газа, в среднем составляет 4—6 *кг*.

На рис. 155 представлен генератор смешанного газа с водотрубным котлом-утилизатором.

Котлы-утилизаторы имеют то неудобство, что они засоряются пылью и сажей. Засорение труб увеличивает сопротивление движению газов, ухудшает теплопередачу от газов к воде и вынуждает выключать генераторы для очистки котлов, если только не имеется обводного канала для газа и независимого от котла подвода пара к генератору.

Вопрос о целесообразности установки котлов-утилизаторов в установках смешанного газа требует тщательной техно-экономической проработки ввиду низкой температуры выходящих из генератора газов (400—500°) и малого съема пара. Повидимому, целесообразнее развивать поверхности нагрева в самом газогенераторе (высокая рубашка, металлическая крышка).

Котлы-утилизаторы в установках водяного газа

В установках для получения водяного газа устанавливают как индивидуальные, так и групповые котлы. В последнем случае физическое тепло водяного газа в котлах не используется. Эти котлы обычно снабжаются водоподогревателями и пароперегревателями.

В установках водяного газа тепло, содержащееся в продуктах воздушного дутья, составляет большую величину — порядка 25—30%. Преимущественно это тепло используется для получения пара в количествах, превышающих потребность самой генераторной станции. Перед котлами устанавливаются камеры сгорания для дожигания горючих газов. В этих камерах обычно выкладывают шамотную насадку для создания постоянного очага высокой температуры. Эти же насадки смягчают до известной степени колебания температур поступающих в котел газов. Для отвода газов, минуя котел, предусматривают непосредственное соединение камер горения с дымовой трубой.

Условия работы котлов, применяющихся в установках водяного газа, довольно тяжелые. Температура подводимых к ним газов обычно значительно выше, чем в установках для получения смешанного газа; кроме того в случае установки индивидуальных котлов у отдельных генераторов, а также пропуска через котлы водяного газа в целях использования его физического тепла в котле имеют место значи-

тельные колебания температур, вредно влияющие на прочность и плотность соединений.

В установках водяного газа применяются как горизонтальные, так и вертикальные котлы типа дымогарных. На рис. 156 представлен вертикальный котел. В нем отходящие газы идут сверху вниз в направлении, противоположном циркуляции воды; котел стоит наклонно, и уровень воды в пароводяном барабане поддерживается таким, чтобы трубы целиком были покрыты водой.

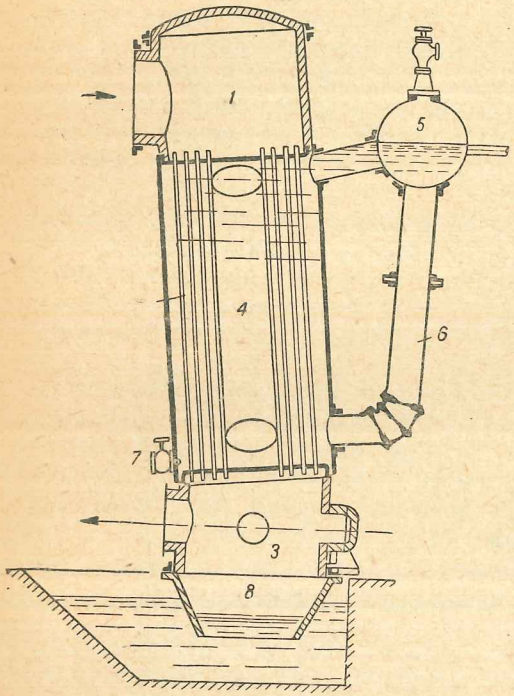


Рис. 156. Вертикальный дымогарный котел-утилизатор:

1—распределительная камера, *2*—дымогарные трубы, *3*—сборная камера для прошедших котел газов, *4*—водяное пространство, *5*—пароводяной барабан, *6*—циркуляционная труба, *7*—спускной кран, *8*—камера для пыли—гидравлический затвор

В нижней сборной камере улавливается из газа пыль.

Подобный котел, обслуживающий генератор водяного газа диаметром в 3050 *мм*, снабжен 295 трубками диаметром в 57 *мм* и длиной в 5,5 *м* и имеет поверхность нагрева в 290 *м*². Рабочее давление — 20 *ат* (155).

В установленном на одном из заводов СССР вертикальном котле с дымогарными трубами (фирма «Пауэргаз»), предназначенном для получения пара с давлением 19 *ат* при работе с дожиганием оказались сильные течи вследствие значительных колебаний температуры в местах вальцовки труб и жесткости всей системы; работу приходится вести без дожигания, т. е. с использованием лишь небольшой части теряющегося тепла. В установленном на другом заводе фирмой «Ньютон-Чемберс» горизонтальном котле с дымогарными трубами также на 19 *ат* через 2—3 часа после пуска выявилась сильная течь трубных досок, также явившаяся результатом сильных колебаний температуры в местах вальцовки труб и жесткости всей системы; только после установки перед котлом аккумулирующей тепло насадки и отказа от дожигания газов воздушного дутья удалось добиться прекращения течи.

На рис. 157 представлена спроектированная Центральным котлотурбинным институтом (ЦКТИ) установка котла-утилизатора для генератора диаметром 3,6 *м*. Из соображений нечувствительности к температурным колебаниям вертикальных длинных гибких труб ЦКТИ остановился на вертикальном водотрубном котле.

Через котел проходят как продукты воздушного дутья, так и водяной газ. Продукты воздушного дутья предварительно дожигаются в топке. Между топкой и котлом расположены регенеративная насадка с поверхностью 400 *м*² для уменьшения колебания температуры газов и улучшения дожигания газов и пароперегреватели высокого и низкого давления.

Котел состоит из двух барабанов, соединенных изогнутыми кипятильными трубами. Простая форма труб и небольшая длина допускают очистку труб механическими шарошками.

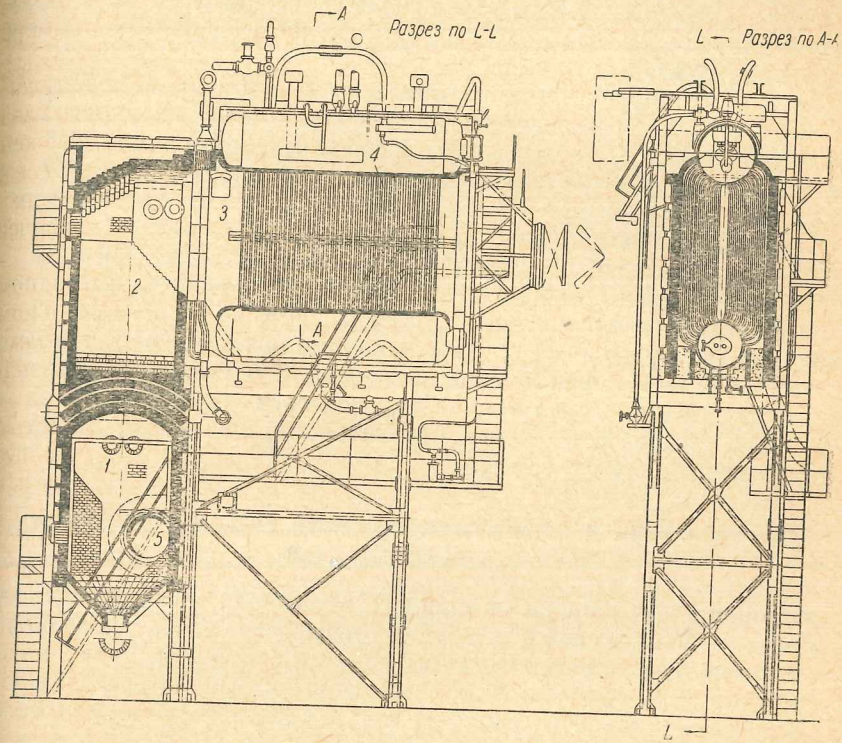


Рис. 157. Водотрубный котел-утилизатор:

1—топка, *2*—регенеративная насадка, *3*—пароперегреватель низкого давления, *4*—котел

Поверхность нагрева котла—450 *м*², диаметр труб—51/45 *мм*, диаметр верхнего барабана — 1300 *мм* и длина—5000 *мм*, диаметр нижнего — 1060 *мм* и длина—4900 *мм*; средняя скорость газов—11,5 *м/сек*, коэфициент теплопередачи в среднем 51 *кал/м² час*; скорость газов доходит до 30 *м/сек*.

Полная паропроизводительность котла — 4800 *кг/час*, максимальный паросъем — в период воздушного дутья — 28 *кг/м² час*. Максимальное количество газов (в период воздушного дутья) составляет 11,6 *м³/сек*, температура газов при входе 950°, при выходе 330°, паросъем—4410 *кг/час*. Минимальное количество газов проходит в период парового дутья сверху — 2,06 *м³/сек*: при этом температура газов при входе составляет 740° и при выходе 220°; паросъем — 336 *кг/час*.

В котел вносится с продуктами воздушного дутья — 79,5% от всего вносимого тепла, водяным газом при дутье паром сверху — 13,5% и при дутье паром снизу — 7%.

Котел и регенератор обшиты 5-*мм* железом. Давление газов в котле в период парового дутья 500—600 *мм*. Сопротивление котла и пароперегревателей при форсировке — 358 *мм* вод. ст.

Практика показывает, что в условиях высоких давлений (больше 15 *ат*) и особенно в случаях сильных колебаний температур в результате периодического пуска в котел газов дымогарные котлы деформируются и дают течи, и в подобных случаях более целесообразно применение водотрубных котлов.

По данным Морриса, котел-утилизатор в установке водяного газа дает 1000 *кг* пара с давлением в 10 *ат* на 1000 $м^3$ водяного газа, что соответствует 12,5% от всего введенного в генератор тепла. По другим данным, на 1000 $м^3$ водяного карбюрированного газа получается 1400 *кг* пара с давлением в 6 *ат*, что соответствует к. п. д. котла в 45%.

Тепловой баланс системы из индивидуального котла-утилизатора с пароперегревателем и перегревателя пара низкого давления из рубашки в установке водяного газа может быть ориентировочно представлен следующими данными: приход тепла — физическое тепло газов горячего дутья — 85%, физическое тепло водяного газа — 15%; расход тепла — в водяном паре, полученном в котле — 40%, перегрев пара высокого давления — 6%, перегрев пара низкого давления — 8%, физическое тепло отходящих газов — 26% и потеря в окружающую среду — 20%.

Перегрев пара и подогрев питательной воды в установках водяного газа

Установки для получения водяного газа снабжаются пароперегревателями. Необходимость сильного перегрева пара, подаваемого в генератор, высокие температуры греющих газов, а также подача в генератор пара только в отдельные периоды вынуждают применять или кирпичные пароперегреватели регенеративного типа или специальные конструкции пароперегревателей.

Обычно пар, подаваемый в генератор водяного газа, перегревается за счет тепла продувочных газов или других видов отбросного тепла.

Несмотря на первоначальные неудачи в этой области, связанные с сильными и быстрыми изменениями температур в трубках перегревателей, с этой задачей справились.

На рис. 158 представлен перегреватель, применяемый в некоторых установках водяного газа. В нем перегревается в трех секциях пар низкого давления из охлаждающих кожухов и в одной секции — пар высокого давления из котла-утилизатора или со стороны (Пауэргаз).

Газ из генератора входит по трубопроводу *1* и выходит по трубопроводу *4*; для дожигания газов предусмотрен подвод вторичного воздуха *3*; подогреватель снабжен огнеупорной футеровкой *2*; железные змеевики *5*, по которым проходит пар, защищены огнеупорными кольцами (из двух половинок, схватываемых кольцом из жароупорного металла). Насадка камеры аккумулирует тепло продуктов горения.

Пар низкого давления из пароперегревателя подается в генератор для дутья. Во избежание перегорания труб пароперегревателя низкого давления при прекращении подачи пара в генератор, специальный клапан направляет пар из охлаждающего кожуха генератора через пароперегреватель низкого давления в магистраль (рис. 95).

Подобный перегреватель [155], обслуживающий генератор водяного газа диаметром в 3 *м*, имеет внутренний диаметр в 2 *м* и полную высоту около 5,5 *м*. Он снабжен 36 петлями паровых трубок с внешним диаметром в 38 *мм*. Длина каждой петли — 4,3 *м*. Поверхность нагрева перегревателя — 37 $м^2$.

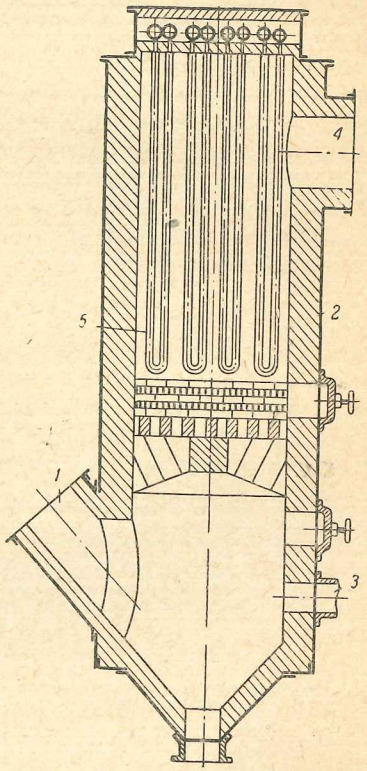


Рис. 158. Пароперегреватель в установке водяного газа

Другие пароперегреватели, как указывалось выше, представляют собой камеры с кирпичной решеткой (обычно — из шамотного кирпича). Пароперегреватели комбинируются с топками для дожигания газа. Объем топок, в которых предусматривается подача вторичного воздуха, определяется из учета интенсивности горения газа порядка 500 000—700 000 *кал*/$м^3$ *час*.

В выполнении пароперегревателя низкого давления по рис. 157 (ЦКТИ) использован принцип регенеративного теплообмена. Пар проходит 72 трубы диаметром 38/30 *мм*, залитые по 3 штуки в чугунные плоские доски — блоки, являющиеся аккумулирующей средой. Вследствие краткости фаз, колебание температуры чугунной брони незначительно и составляет 20° при средней температуре чугуна 480°. Броня снабжена температурными разрезами. 44% тепла передается за счет аккумулирования стенками, остальное рекуперативным путем. 24 блока установлены в два ряда. Они омываются поперечным потоком газа с большими скоростями (50 *м*/*сек*), несмотря на которые имеют малое сопротивление.

Внешняя поверхность нагрева — 35 $м^2$, внутренняя — 20 $м^2$.

Пароперегреватель высокого давления состоит из трубок диаметром 38/32 *мм*, поверхность нагрева его 41 $м^2$, скорость газов в нем 9,5 *м*/*сек*, средний коэфициент теплопередачи — 49,5 *кал*/$м^2$ *час* °С.

В целях увеличения использования тепла в установках водяного газа ставят котлы с водоподогревателями.

Водоподогреватели, применяемые при дымогарных котлах, аналогичны по конструкции котлам и при горизонтальных котлах обычно располагаются над котлом.

При водотрубных котлах обычно применяют подогреватели с чугунными трубами.

Подогрев питательной воды дает возможность дополнительного использования тепла отходящих из котлов газов. Температура газов, покидающих подогреватель, примерно на 50° выше температуры подогрева воды. Температура подогрева воды должна быть ниже температуры кипения во избежание парообразования в подогревателе и в насосах и перебоев в снабжении котла водой.

Охлаждающие кожухи генераторов

Охлаждающие кожухи, несколько ухудшая качество газа у периферии генератора, дают возможность уменьшить шлакование и избежать приваривания шлака к стенкам. Наблюдается тенденция к развитию поверхностей охлаждения в верхней части генератора в целях использования физического тепла газа.

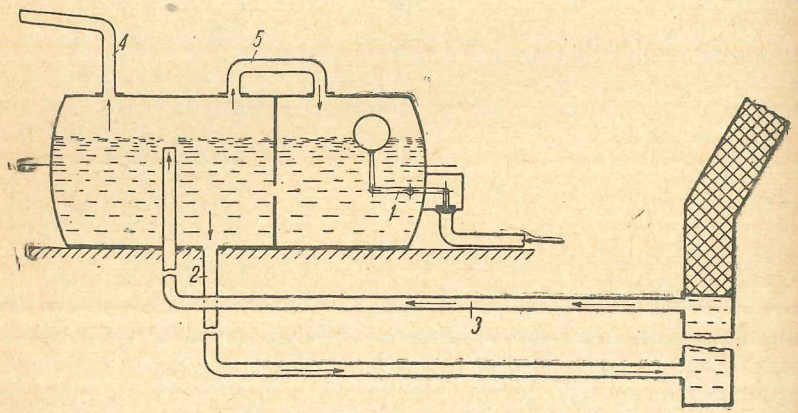


Рис. 159. Охлаждающий кожух и паросборник:

1—автоматический шаровой питательный клапан, *2*—питающая труба, *3*—труба, отводящая горячую воду из рубашки, *4*—отвод пара из паросборника, *5*—труба для выравнивания давления

На рис. 97 представлено устройство охлаждающего кожуха (рубашки, ватержакета) газогенератора. Водяное пространство кожуха соединено двумя трубами с небольшим паросборником. Получаемый в верхней части последнего пар с давлением в 0,5 *ат* (изб.) и изредка — бóльшим используется для дутья. В ватержакете и паросборнике идет непрерывное движение воды. По верхней трубе из наивысших точек рубашки нагретая вода идет в паросборник, где вскипает, и из последнего холодная вода течет в ватержакет по нижней трубе. Для более равномерного отбора пара ватержакет обычно охватывается сверху кольцевой трубой, отбирающей пар по окружности кожуха, и уже эта труба соединяется с паросборником. В нижней части охлаждающего кожуха устанавливают продувной кран. Иногда в охлаждающих кожухах предусматривается и паровое пространство. В этих случаях во избежание перегрева и деформации стенок паровое

пространство находится в области более низких температур генератора или же помещается за огнеупорной футеровкой генератора.

Паросборник представлен на рис. 159. Питание ватержакетов водой производится через автоматические шаровые клапаны паросборников, что дает возможность подводить в рубашку горячую воду и предупреждать коррозию металла рубашки со стороны, обращенной внутрь генератора. Автоматический питательный клапан с поплавком другого типа показан на рис. 84.

Иногда отдельных паросборников не применяют, а в качестве таковых используют верхнюю часть рубашки, изолируя ее от внутренности генератора.

Обычно водяные рубашки изготовляются для низкого давления, так как такие рубашки легче и проще по конструкции и предъявляют меньшие требования в отношении ухода и обслуживания.

Все же иногда предусматривают возможность поддержания в рубашке более высокого давления, выполняя их в виде котлов высокого давления или соединяя их с таковыми. В установках водяного газа часто применяют рубашки, дающие пар с давлением, близким к давлению в главном паропроводе.

Отбор рубашками тепла от слоя топлива понижает несколько теплотворную способность газа. Количество тепла, отбираемое рубашкой, обычно не превышает 10% от теплотворной способности топлива.

Высоту рубашек применяют различную, располагая их или только соответственно аскаленной зоне или по всей высоте шахты или слоя. Обычно высота рубашек не менее 1,5 *м*.

Чтобы в рубашках и трубах не образовалась накипь, их следует питать умягченной водой. Рубашки делают или достаточно высокими и широкими, чтобы возможна была их чистка изнутри (ширина — 400—500 *мм*), или значительно более узкими (150—200 *мм*), предусматривая многочисленные лючки для возможности чистки снаружи; в некоторых конструкциях чистка рубашки производится путем подъема ее вверх после разъединения соединительных трубопроводов. Для возможности подъема рубашки бункер генератора отнесен в сторону.

Из генераторов, снабженных рубашками высокого давления, следует особо отметить генераторы Маришка (рис. 160) [120], в которых шахта представляет собой котел, состоящий из двух барабанов, соединенных трубками, развальцованными в плитах барабанов. Большая часть котла заключена в футерованный железный кожух, снабженный многочисленными лючками и дверцами для чистки и удаления пыли. Парообразование происходит за счет отдачи тепла топливом и газами.

В генераторе Маришка диаметром в 2 *м* поверхность нагрева котла — 55 *м*². При газификации кокса с содержанием влаги в 16% и золы в 14,56% напряженность поверхности нагрева составляет 13,8 *кг/м² час* (1,2 *кг* на 1 *кг* кокса), давление пара 6 *ат*, температура выходящего из генератора газа 180° (см. также ч. II, стр. 269).

Из всего получаемого в генераторах Маришка пара 20% расходуется на собственные нужды газогенератора, остальной же пар идет на привод двигателей и другие заводские нужды.

Чистка котлов от накипи производится через 4 месяца 2 рабочими в течение 6 дней. Систематический предупредительный ремонт был настолько целесообразен, что в течение 10-летней работы ни один котел не был заменен новым.

В качестве недочета установки следует отметить ее высокую начальную стоимость. В новейших конструкциях подобных генераторов в верхних частях устанавливают пароперегреватель.

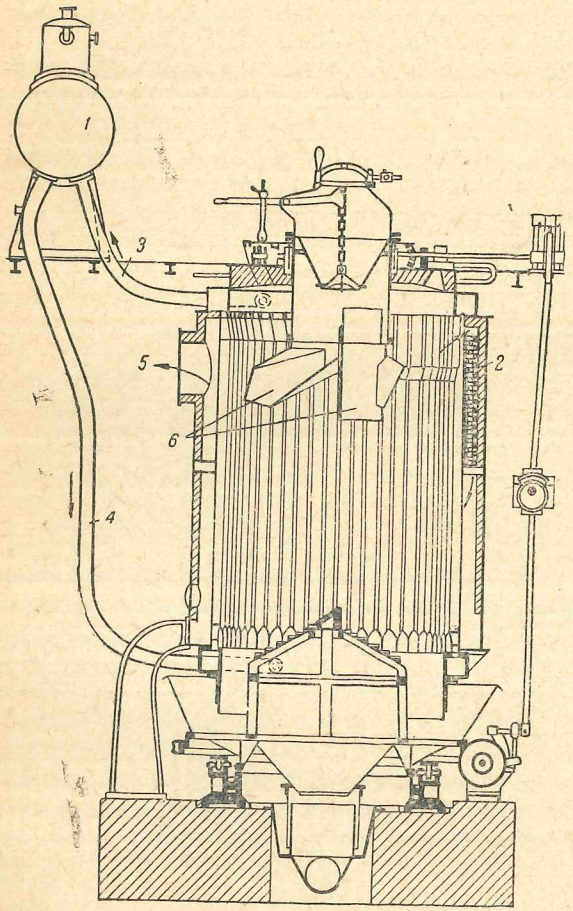


Рис. 160. Генератор Маришка:

1—паросборник, *2*—пароперегреватель, *3*—отводящая пар труба, *4*—обратная труба, *5*—выход газа, *6*—аппарат для распределения топлива по сечению

Иногда охлаждающие кожухи выполняют в виде экранных котлов высокого давления, состоящих из отдельных труб (рис. 155) с барабанами, находящимися вне генератора.

Тепловой баланс рубашки по данным Люта [156] следующий: приход — тепло питательной воды при 15° — 2,7%, тепло, полученное из генератора, — 97,3%; расход--теплосодержание пара — 91,1%, конденсационной воды — 0,1%, сливной воды — 2,1%, потеря в окружающую среду — 6,7%.

Напряженность поверхности нагрева рубашек может быть принята в пределах 10—30 *кг/м² час*. Как показывают исследования, количество получаемого в рубашках пара растет почти пропорционально производительности генератора, количество же пара, получаемого на 1 *кг* топлива, меняется мало. Иностранные фирмы в своих гарантиях часто указывают, что на 1 *кг* антрацита или кокса в рубашках может быть получено 0,5 — 0,6 *кг* пара.

Расход тепла на получение пара в рубашке составляет в зависимости от размеров рубашки и хода генератора от 3 до 10% от теплотворной способности топлива.

В охлаждающих кожухах генераторов можно получать не пар, а горячую воду. Это может иметь смысл например при пользовании неочищенной водой и при потребности производства в горячей воде и кроме того придает большую безопасность и простоту устройству и предъявляет меньшие требования в отношении надзора. Максимальная допустимая температура нагрева для неочищенной воды 40—50°, в случае же очищенной воды — обычная температура 80°. При низкой температуре воды возможна коррозия рубашки вследствие конденсации на внутренней поверхности рубашки влаги дутья.

Рамбуш [120] дает следующие практические цифры количества воды, расходуемой в водяных рубашках при подогреве до 70° (в *м³* на 1 *м²* поверхности нагрева в час): для кокса — 0,5, каменного угля — 0,4 и бурого угля — 0,2 (величина для бурого угля повидимому относится к случаю применения генератора без швельшахты).

В генераторе, работающем на газовом коксе, снабженном рубашкой с поверхностью нагрева в 12 *м²*, расходуется 535 *кг* воды на 1 *м²* поверхности рубашки. Учитывая производительность генератора в 800 *кг/час* и теплотворную способность кокса в 6100 *кал/кг*, получаем, что теплосодержание воды составляет от теплотворной способности топлива:

$$\frac{12 \cdot 535 \cdot (70 - 15) \cdot 100}{6100 \cdot 800} = 9{,}2\%.$$

Использование этой воды для увлажнения воздуха не дает возможности достаточно ее охладить, и в этом случае требуется или дополнительное охлаждение воды или повышение скорости циркуляции.

Получение пара за счет охлаждения верхней части генератора

Для использования физического тепла генераторного газа в целях получения пара для дутья в случае бессмольного газа может быть применено устройство верхней части генератора в виде охлаждающего кожуха или крышки с водой, омываемых газом. Эти приспособления часто предназначаются для работы с тем же давлением, с которым воздух подается в генератор.

Подобные устройства, отнимающие тепло от газа, но не от зоны газификации, не могут иметь влияния на состав газа.

На рис. 161 представлен генератор диаметром в 2800 *мм* с металлической крышкой, в которой получается пар, необходимый для увлажнения дутья. Крышка генератора — стальная и снабжена по периферии полым кольцом, спущенным в шахту и имеющим высоту в 750 *мм*. Вода, заполняющая кольцо и часть крышки, нагревается за счет лучеиспускания раскаленного топлива и отдачи тепла газом. Крышка снабжена водоподводящей и сливной сифонной трубками. Часть вводимого в генератор воздуха специальным приспособлением ответвляется в крышку, где, проходя над горячей водой, увлажняется. Регулированием количества воздуха, пропускаемого в крышку, или количества воды, подаваемой в крышку и постоянно спускаемой через сливную трубку (следовательно регулированием ее температу-

ры), устанавливают надлежащую температуру паровоздушной смеси и надлежащее влагосодержание воздуха. В результате за счет физического тепла генераторного газа получается необходимый для увлажнения дутья пар.

Испытания подобного генератора на антраците (Семилукский шамотный завод) выявили следующие данные: суточная производительность генератора — 12,4 *т*, выход газа — 4,25 *м³/кг*; температура паровоздушной смеси 42°, температура выхода газа из генератора 416°; температура поступающей в испаритель воды 2°; температура выходящей воды 77°; количество пара, поступающее в генератор из испарителя, — 0,227 *кг/кг*; количество слившейся из испарителя избыточной воды — 620 *кг/час* (1,2 *кг/кг*).

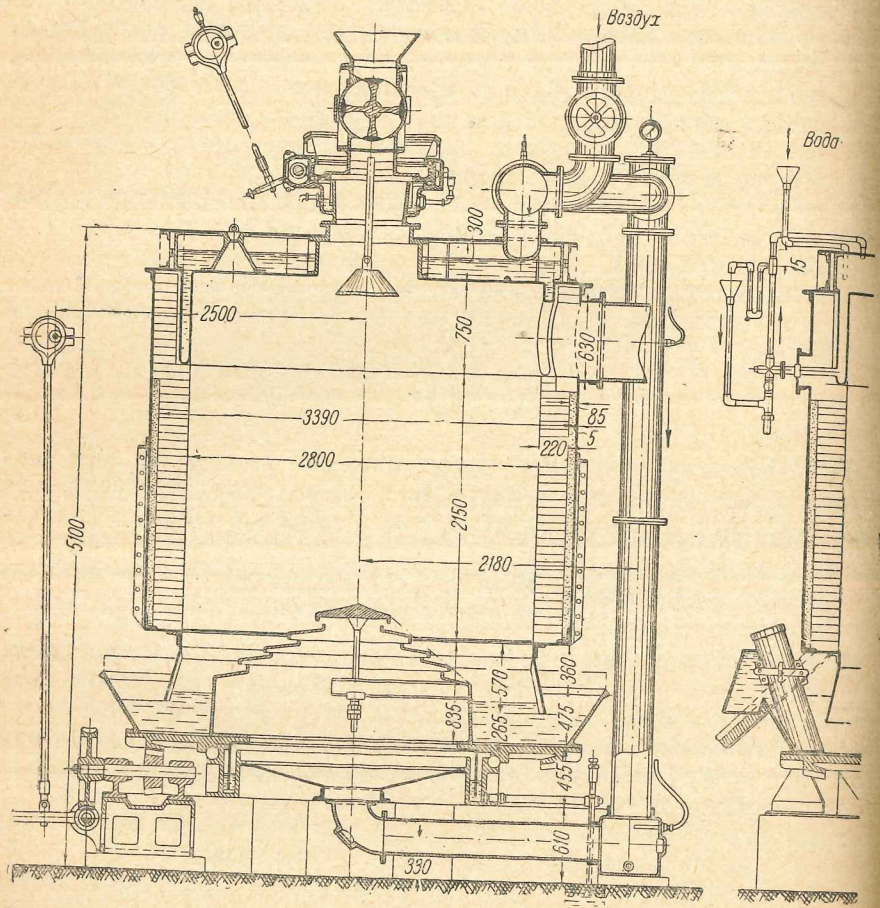


Рис. 161. Генератор с металлической крышкой

Устройство требует постоянного наблюдения вследствие зависимости парообразования от режима генератора и тепла, аккумулированного водой испарителя.

Чистка испарителя производится путем съема перекрывающих его листов. Очевидно, что количество пара, получаемого в подобном испарителе, зависит от количества и температуры отходящих газов, от состояния поверхности топлива, от размеров поверхности нагрева испарителя и количества добавляемой в него воды.

Как указывает Рамбуш [120], подобные испарители должны рассчитываться при хорошем топливе, с низким содержанием летучих, на получение до 1 *кг* пара на 1 *кг* топлива. При начальной температуре газов в 650—700°, по его данным, следует принимать 0,05—0,07 *м²* поверхности нагрева на 1 *кг* пара в час, что будет соответствовать использованию в паре примерно 8% от теплотворной способности топлива. Температура газа при выходе из генератора составляет примерно 350°.

Испарители должны снабжаться продувными кранами и должны быть доступны для чистки от накипи и осадков; питательная вода должна быть возможно мягче и чище.

Регенеративные испарители

Использование тепла продувочных газов генераторов водяного газа для получения пара возможно не только в котлах, но и в регенеративных испарителях, в которых в один период нагревается насадка из стойкого в отношении изменения температур материала, а в другой—подается вода, испаряющаяся за счет тепла насадки. Сложность подобной установки, оборудованной многочисленными клапанами, и трудность подбора материала насадки до сих пор препятствовали распространению этого вида приспособления (см. гл. II).

Использование тепла охлаждающей воды

Вода, охлаждающая газ, может быть использована для увлажнения воздуха дутья, что имеет особенное значение в случае смолистого газа, когда невозможна установка котлов-утилизаторов.

На рис. 162 представлена установка, в которой для увлажнения дутья используется подсмольная вода. Последняя не может быть спущена в канализацию вследствие содержания в ней фенолов. Подсмольной водой охлаждают боковую решетку, шуровочную штангу, трубчатый цилиндр под питателем и вращающуюся крышку генератора. Нагретую до 80° подсмольную воду в прямотоке с воздухом пропускают через скруббер с хордовой насадкой [123].

Простым и распространенным устройством для использования тепла охлаждающей воды для увлажнения дутья является двухступенчатый скруббер, в котором в верхней ступени газ охлаждается водой, а в нижней ступени перетекающая туда вода орошает подаваемый в генератор воздух и увлажняет его. Сравнительно легко подобный увлажнитель можно сделать нечувствительным к загрязнениям смолой, пылью и сажей.

При проектировании охладителей-увлажнителей следует учитывать, что газ должен отдать больше тепла, чем его требуется для увлажнения, и что температура насыщенного лагой газа при выходе

из охладителя будет на 5 — 10° выше температуры увлажненного воздуха.

Если для хорошей работы увлажнителя необходима высокая температура воды, то для хорошего охлаждения газа требуется возможно низкая температура воды, что часто заставляет работать в подобных устройствах с недостаточным использованием физического тепла газа. В описанном ниже трехступенчатом скруббере (рис. 163), установленном на заводе «Гусь-Хрустальный», этот недочет устранен.

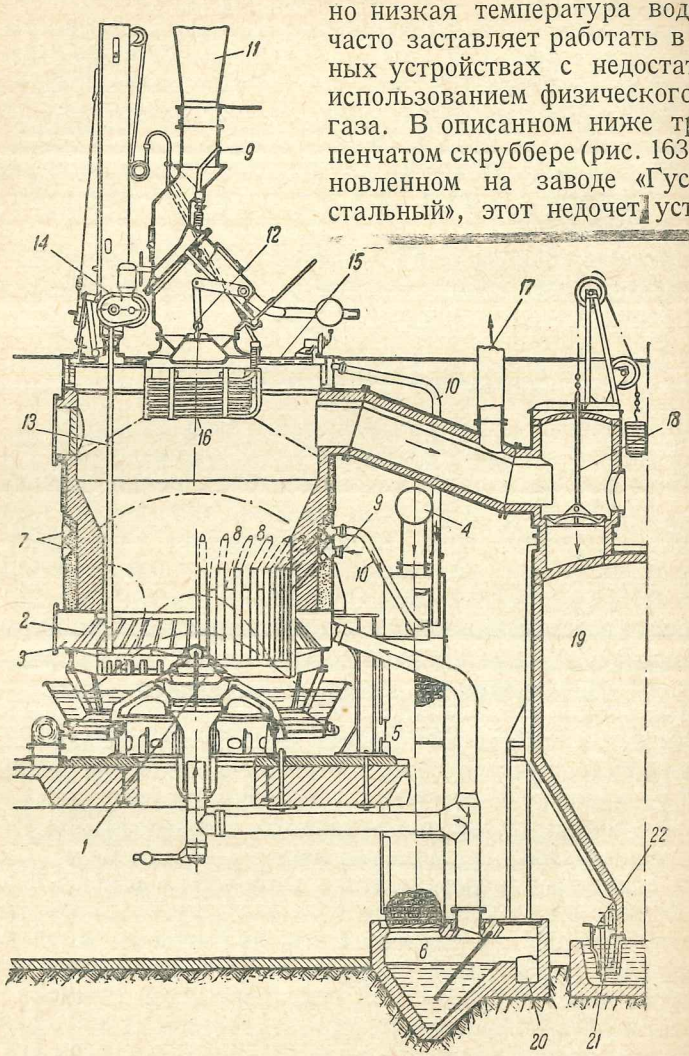


Рис. 162. Генератор с двойной решеткой:

1—вращающаяся решетка, *2*—вспомогательная решетка, *3*—воздушная камера, *4*—воздухопровод, *5*—воздухонасытитель, *6*—водяная яма, *7*—водяная камера, *8*—трубки, охлаждающие стенки шахты, *9*—подвод воды, *10*—отвод воды, *11*—угольный бункер, *12*—загрузочная коробка, *13*—шуровочная штанга, *14*—привод шуровочной штанги, *15*—вращающаяся крышка, *16*—трубчатый цилиндр, *17*—труба для разжига, *18*—клапан, *19*—пылеуловитель и коллектор, *20*—слив воды, *21*—канава для подсмольной воды, *22*—скребок для удаления осадков

Газ входит в среднюю *2* ступень скруббера с температурой 75°, орошается теплой водой, несколько охлаждается и поступает для дополнительного охлаждения до 25—30° в верхнюю *1* ступень, куда подается холодная вода. Горячая вода стекает в нижнюю ступень, где орошает и увлажняет воздух, поступающий в дальнейшем для газификации. Таким образом верхние два отделения служат для охлаждения генераторного газа, а нижнее — для увлажнения подаваемого в генератор воздуха. Заполнением для скруббера служат кольца Рашига. В устройстве имеются два цикла воды—холодный и горячий. Холодная вода подается центробежным насосом в верхнее отделение скруббера и вращающимся распределительным устройством разбрызгивается по всему поперечному сечению скруббера. Вода из верхнего отделения, пройдя предварительно маслоотделитель, поступает на градирню для охлаждения. Холодная вода поступает в приямок генераторного здания, откуда вновь подается насосом в верхнее отделение скруббера. Вода этого цикла—холодного—не используется для насыщения воздуха.

Нижние два отделения обслуживают одновременно и охлаждение газа и увлажнение дутья (цикл горячей воды). Центробежный насос подает теплую воду из второй ямы во вращающийся распределитель среднего отделения, разбрызгивающий воду. Теплая вода охлаждает более горячий газ, нежели в предыдущем цикле, нагревается сильнее и собирается в нижней части среднего отделения, поступая отсюда через маслоотделитель в нижнее отделение скруббера.

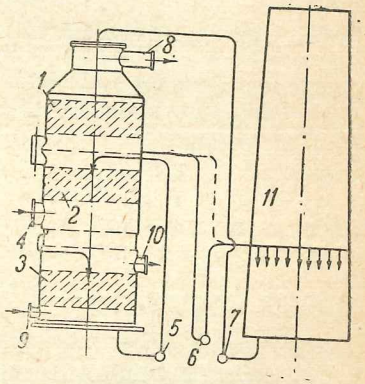


Рис. 163. Трехступенчатый скруббер A. V. G.:

1—верхняя ступень, *2*—средняя ступень, *3*—нижняя ступень, *4*—вход газа, *5*—насос горячего цикла воды, *6*—насос холодного цикла воды, *7*—насос холодного цикла, подающий воду в скруббер, *8*—выход охлажденного осушенного газа, *9*—вход воздуха, *10*—выход увлажненного воздуха, *11*—градирня

Воздух выходит из нижнего отделения насыщенным с температурой в 45—50° и направляется к генераторам. Дальнейшее увлажнение его до температуры насыщения в 55—60° достигается добавкой пара из паросборников кожухов. Охлажденная вода из нижнего отделения подается вновь во второе отделение для орошения и охлаждения газа. Скруббер обслуживает 8 генераторов (из них один — резервный) производительностью по 50 *т* торфа в сутки. Диаметр его — 4,5 *м* и общая высота — 20 *м*.

Скруббер запроектирован на пропуск 7,6 $м^3$ сырого газа в секунду. При этом продолжительность пребывания газа в нем — 22 сек.

Недостатком этого скруббера оказалось то, что при наличии в газе паров уксусной кислоты воздух, пройдя нижнее отделение скруббера, воспринимает из орошающей его воды уксусную кислоту, вымытую водой из газа, и сильно разъедает воздухопровод. Кроме того кольца Рашига сравнительно быстро засоряются.

В подобной же установке Уральского завода тяжелого машиностроения в условиях промывки газа до скруббера в аппарате Штре-

дера (водой) и наличия в газе избытка аммиака коррозии воздухопровода и засорения насадки скруббера не наблюдается.

При исследовании коксового генератора [157], снабженного скруббером со ступенью для увлажнения первичного воздуха (двухступенчатый скруббер), количество тепла, отбираемого воздухом (в теплосодержании паровоздушной смеси), оказалось равным при нормальном ходе 3,25% и при форсировке (на 50%) — 2,5% от теплотворной способности кокса.

Работа двухступенчатого скруббера (с одной ступенью — для охлаждения газа и второй—для увлажнения дутья) при работе на буром угле характеризуется [158] следующими данными: температура подогрева воды 60°; температура воды, охлажденной в увлажнительной ступени 40°, производительность генератора—16 *т/сутки*; количество подаваемого воздуха — 925 *м³/час*; необходимая добавка пара к дутью — 100 *г/кг*; требуемая температура насыщения воздуха 41°; содержание влаги в воздухе при его входе в увлажнительную ступень (15°, 80%-ная влажность) — 11 *г/м³*; требуемое содержание влаги— 67 *г/м³*; испаряется влаги в скруббере—56 *г/м³*; теплосодержание 1 *м³* воздуха и 67 *г* водяного пара при 41° — 54,2 *кал/м³*, теплосодержание 1 *м³* воздуха и 11 *г* водяного пара при 15°—11,2 *кал/м³*; тепло, приобретаемое воздухом в увлажнительной ступени: $(54{,}2 - 11{,}2) \cdot 925 = 40\,000$ *кал/час*; потребное количество воды при к. п. д. увлажнительной ступени, равном 0,8, составляет $\frac{40\,000}{20 \cdot 0{,}8} = 2500$ *кг/час*; количество воспринимаемой воздухом влаги — 52 *кг/час*.

В табл. 69 приведены средние данные по работе двух установок, снабженных описанными выше трехступенчатыми скрубберами [159].

Таблица 69

Данные по работе установок, оборудованных трехступенчатыми скрубберами

Данные	Брикеты бурого угля	Сырой бурый уголь
Производительность установки в сутки (в *т*)	100	220
Влажность топлива (в %)	15	55
Выход газа на 1 *кг* топлива (в *м³*)	2,5	1,4
Точка росы газа при выходе из генератора (в °С)	57	74
То же по выходе из смолоотделителя (в °С)	61	74
Температура газа перед скруббером (в °С)	80	75
Количество воздуха, потребного на 1 *кг* топлива (в *м³*)	1,6	0,85
Количество пара, потребного на 1 *кг* топлива (в *кг*)	0,3	0,1
Потребная температура насыщения воздуха (в °С)	59	52
Насыщение воздуха, достигаемое в скруббере (в °С)	57	52
Количество пара, получаемого в скруббере на 1 *кг* топлива (в *кг*)	0,265	0,1
Недостающее количество пара: в *кг*	0,035	—
» %	11,6	—

Недочетом подобных установок являются их большая начальная стоимость, громоздкость и конденсация влаги в воздухопроводе. Для уменьшения последней воздухопровод изолируют.

Вообще при наличии теплой воды в производстве она может быть использована для увлажнения дутья. Для этой цели применяют цилиндрические резервуары, снабженные деревянными решетками, по которым вода стекает вниз навстречу поступающему снизу воздуху, увлажняя его.

Кроме решетчатых увлажнителей применяют увлажнители с разбрызгивающими приспособлениями (соплами-пульверизаторами), в которых теплая вода мелко распыливается и частично испаряется, частично остается в воздухе в виде мельчайших частиц—тумана.

Аналогичное устройство может быть применено и в случае наличия горячего воздуха. Мелко распыленные частицы воды в горячем воздухе испаряются за счет тепла воздуха, и паровоздушная смесь может быть подана в генератор.

Увлажнение нагретого воздуха может быть скомбинировано с подсушкой топлива, например торфа или бурого угля.

Испарители Бендера и Фрембса

Недочетом применения насыщенного пара во всех случаях является конденсация его в воздухопроводах. Эта конденсация, а также установка дорогого котла с отдельным обслуживанием отпадают при устройстве испарителей, в которых водяной пар получается за счет

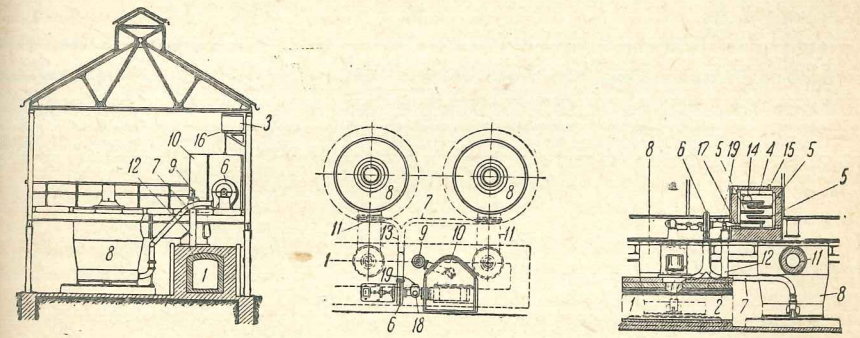


Рис. 164. Испаритель Бендера и Фрембса

сжигания некоторого количества газа из генератора. Устройство подобного испарителя системы Бендера и Фрембса представлено на рис. 164.

Испаритель состоит из сожигательной камеры *10*, испарительной камеры *4*, вентилятора *6* с мотором и водяного бака *3*. Генератор *8* соединен с газосборником *1* газопроводом *11*. В сожигательную камеру *10* из газосборника *1* через отверстие *2* по газопроводу *12* отсасывается небольшое количество газа, регулируемое вентилем *9*. На поду сожигательной камеры расположена горелка, с обеих сторон которой подводится воздух для сжигания газа, регулируемый ши-

берами. Продукты сгорания поступают через отверстие *14* в камеру испарения *4* с чугунными корытами *5*, по которым стекает вода, подаваемая из бака *3* воронкой *15* и регулируемая вентилем *16*. Вода испаряется продуктами сгорания, и смесь их с водяным паром с температурой 300—400° через отверстие *17* засасывается вентилятором *6*. Одновременно через отверстие *18* засасывается извне воздух, количество которого регулируется шибером *19*. Количество смеси воздуха, водяного пара и продуктов горения, подаваемой вентилятором через общий трубопровод *13* и к отдельным генераторам, регулируется шиберами.

Температура смеси, подаваемой в генератор, 150—170°, что предупреждает возможность конденсации водяного пара и образования сернистой кислоты, разъедающей воздухопровод. Содержание CO_2 в смеси достигает 1—1,6%.

Расход газа на получение пара составляет в этих испарителях примерно 3% от всего количества газа. Получающаяся в результате горения газа углекислота в генераторе восстанавливается в CO и действует, так же как водяной пар, охлаждающим образом.

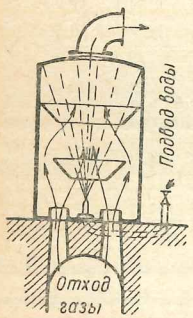


Рис. 165. Схема устройства для использования тепла продуктов горения для испарения воды

Испаритель может быть применен в небольших установках смешанного газа. При производительности в 6000 *кг* пара в сутки внешние размеры испарителя 2,1×2,3×2,3 *м*.

Получение пара за счет тепла отходящих газов тепловых установок

Использование тепла продуктов горения для испарения воды и подачи смеси водяного пара предложено Гинсельманом. Схема устройства представлена на рис. 165. Отходящие газы, отсасываемые вентилятором через ответвление от дымового борова, испаряют в специальной камере-испарителе распыливаемую пульверизатором воду. Смесь отходящих газов и водяного пара отсасывается вентилятором и подается в генератор.

Более простая регулировка достигается при установке воздухоподогревателя, отапливаемого отходящими газами, и испарении влаги нагретым воздухом.

Оборудование парового хозяйства

Получение в генераторных установках избыточных количеств водяного пара, возможность получения в котлах-утилизаторах пара более высокого давления, чем в рубашках, наличие потребителей, нуждающихся в паре повышенного давления (шуровочные затворы, для получения энергии), — вызывают устройство двух паровых линий — высокого и низкого давления: первой — соединенной с котлами-утилизаторами и второй — соединенной с рубашками. Обе линии соединяют для возможности перепуска пара высокого давления в магистраль низкого давления (через редукционный вентиль), причем генератор питают паром низкого давления. В качестве последнего может быть также применен мятый пар, уже использованный для получения энергии.

При отсутствии котлов-утилизаторов пар подается в магистраль высокого давления из заводской или специально сооружаемой котельной установки.

Магистраль низкого давления, соединяющая котелки пароводяных барабанов рубашек, обслуживает подачу пара в генератор и прогрев смоляных лотков и ям и других устройств; другая же магистраль, более высокого давления, в которую пар подается из котельной или из котлов-утилизаторов, обслуживает подачу пара для получения энергии, для паровых завес, к калориферам для отопления, в магистраль низкого давления при недостатке пара и т. д.

В установках водяного газа паровое хозяйство является большим и сложным. Получаемый в котлах-утилизаторах в значительных количествах пар используется для привода воздухо- и газодувок и насосов и отдается на сторону. Возможно использование его и для подачи в генератор, хотя обычно в генератор подают пар более низкого давления. Получаемый в котлах-утилизаторах и охлаждающих рубашках пар перегревается за счет тепла газов воздушного дутья. Возможен также подогрев питательной воды.

Наиболее значительным потребителем энергии в установках водяного газа является воздуходувка. Использованный ею пар может быть применен для подачи в генераторы. Однако даже в больших установках количество получаемого из воздуходувок пара часто не соответствует потребности, то превышая ее, то являясь недостаточным.

Это неудобство устраняется аккумуляторами пара, представляющими собой большой бак, соединенный с линией мятого пара. При наличии избытка пара давление в линии повышается, и мятый пар конденсируется в воду, подогревая ее, и наоборот, при недостатке пара вода испаряется, восполняя недостаток его.

В малых установках водяного газа на заводах, где отсутствует пар и нерентабельно применение котлов-утилизаторов и генераторов с охлаждающими кожухами, пар для питания генераторов может быть получен в регенеративных испарителях с насадкой, разогреваемых в период воздушного дутья.

Запас воды в рубашках, пароводяных барабанах и котлах-утилизаторах невелик; перерыв в снабжении их водой опасен. Известны случаи прогара рубашек и выпучивания их в результате обнажения поверхностей, соприкасающихся с раскаленным топливом, а также случаи взрывов вследствие попадания больших количеств воды при восстановившемся питании на оголенные от воды, раскаленные поверхности.

Рубашки, как и котлы-утилизаторы, должны быть обеспечены питанием водой от двух водоводов. На случай прекращения подачи воды по водопроводам рубашки необходимо обеспечить питанием водой из специальных баков. Питание котлов, работающих с значительным давлением, обеспечивается от парового и центробежного насосов.

Очень большое значение имеет также надежное автоматическое питание котла, обычно производимое с помощью поплавковых клапанов, которые должны обеспечивать основное питание (резервное — ручное от вентиля) (рис. 84).

Котлы и паропроводы снабжаются обычными для котельных установок арматурой и оборудованием — конденсационными горшками, предохранительными клапанами, отводами в атмосферу, водомерными стеклами, манометрами, водомерами и пр.

При возможном наличии в генераторном газе или в продуктах горения продувочных газов сернистого газа SO_2 во избежание коррозии труб подогревателей или котлов, имеющей место при холодной воде и конденсации из газов влаги, следует применять подогретую питательную воду.

Температура подогрева должна быть выше точки росы газов. Для подогрева воды возможно смешение ее с выпускаемой из подогревателей водой или использование отработанного пара.

☆

Глава пятая

СВОЙСТВА ТОПЛИВА ДЛЯ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ

☆

1. ТОПЛИВО, ЕГО СОСТАВ И СВОЙСТВА

Топливом называют содержащие органические вещества горючие, которые способны сгорать в воздухе с выделением значительного количества тепла, достаточно распространенные и могущие быть практически использованными в качестве источников тепла.

Классификация топлив

Различают твердые, жидкие и газообразные топлива. Каждую из этих групп топлив разделяют на подгруппы — естественное и искусственное топливо. Переработка топлива предпринимается для возможности более полного и рационального его использования.

Путем механической переработки получают брикеты. Они изготовляются путем прессования из мелкого малоценного топлива с добавкой связующих веществ. Связующим веществом обычно служит каменноугольный пек. Некоторые сорта бурых углей не требуют добавки связующего вещества, так как их смолистые вещества под высоким давлением плавятся и связывают вещество брикета.

Перед брикетированием бурые угли высушиваются до содержания влаги в 15%. Иногда применяют мокрое прессование бурых углей, при котором избегается искусственная сушка угля. При этом способе уголь увлажняется до достижения пластического состояния и прессуется в брикеты, высушиваемые на воздухе до достижения влажности около 25%.

Искусственным топливом, получаемым путем термической переработки топлива, является кокс или полукокс—твердый остаток от топлива, образующийся в результате высоко- или низкотемпературной перегонки топлива. Коксовый остаток получается как основной или вспомогательный продукт перегонки (древесный уголь, кокс на коксовых и газовых заводах, полукокс при швелевании). В последнее время в целях удобства применения буроугольный швелькокс брикетируют после добавления к нему отработанных щелоков целлюлозного производства и суспензии глины.

Газы, изучаемые в настоящей работе, являются топливом искусственным, получаемым из естественных твердых топлив — дров, торфа, бурого угля, каменного угля, антрацита и сланца или из искусственных твердых топлив—брикетов и кокса.

Возраст	Класс I	Класс II	Класс III	Класс IV
А. Торфы	**Сапропелиты** — в органической массе 8—10% водорода; не содержат смол, восков и гуминовых кислот; содержат органические кислоты и их ангидриды; дают высокий выход первичного дегтя, не содержащего фенолов, асфальтенов и силикагелевых смол; остаточный уголь спекается и вспучивается. **Сапропелитовые торфы** — резиноподобная масса, содержащая альги, хлорофил и много растворимых кислот (куронгит и балхашит).	**Гумусовые угли** — рыхлые бурые или блестящие твердые черного цвета вещества; содержат воски, смолы и гуминовые кислоты или углеводороды, смолы и гумиты; дают первичный деготь, содержащий асфальтены, смолы и много фенолов (35—50%); содержание водорода в органической массе не более 5%; остаточный уголь не спекается. **Сухие торфы** — светлобурая рыхлая масса, состоящая из гуминовых кислот и содержащая воски, смолы и форменные элементы растений (листья, хвою, древесину).	**Смешанные сапропелито-гумусовые** — преобладает сапропелитовая часть; содержат гуминовые кислоты или гумиты, неполимеризованные и полимеризованные, жирные кислоты и продукты их декарбоксилирования; дают спекшийся полукокс и дегти, содержащие карбоновые кислоты, мало смол, асфальтенов и фенолов (5,18%); первичный газ богат метаном (60—70%); остаточный уголь спекается. **Болотные сапропели**—содержат остатки неразложившихся растений в сапропелито-гумусовой основной массе, заключающей много растворимых жирных кислот и их солей.	**Смешанные гумусово-сапропелитовые** — преобладает гумусовая часть; содержат много гумусовых кислот или гумитов, смолы, воски и углеводороды; дают порошкообразный полукокс и первичные дегти, содержащие значительные количества асфальтенов, смол и фенолов (18—30%), остаточный уголь не спекается. **Болотные торфы** — состоят из сильно оводненных, набухших гуминовых кислот, смол, восков, жирных кислот и их полимеров; содержат форменные элементы растений.
Б. Бурые угли	**1. Богхеды** — сапропелиты, содержащие остатки альг и не содержащие или почти не содержащие спор. а) Богхеды плотные — дают раковистый излом, мало содержат экстрагируемых веществ (2—4%). б) Богхеды слоистые — многозольные, легко расщепляются, содержат много экстрагируемых веществ (10—15%). **2. Кеннельские сапропелиты** — в основной сапропелитовой массе содержат остатки альг и много спор (мега и микро). **3. Масляные сланцы** — плотные богхеды, содержащие включения нейтральных масел, сходных с нефтью.	**1. Бурые угли** — светло- и черно-бурая масса, содержащая гуминовые кислоты, гуматы, воски и смолы, иногда гумиты. а) Битуминозные бурые угли — содержат извлекаемого спиртобензолом битума больше 10%. б) Перегонные бурые угли — содержат от 5 до 10% битума. в) Тощие бурые угли — содержат битума меньше 5%. **2. Гумусовые кеннели** — содержат много спор в основной гумусовой массе и дают высокий выход дегтя (15—20%).	**1. Гумусовые богхеды** — плотные образования, содержащие растворимые в водной щелочи гуминовые кислоты и сильно кислые битумы. 2. **Сапропелито-гумусовые угли** — черно-бурые с раковистым изломом или ясно заметной штриховатостью. а) Витритовые — блестящие пекоподобные угли с раковистым изломом. б) Полосчатые угли — с преобладанием витрита и без фузита.	**Болотные торфы** — состоят из сильно оводненных, набухших гуминовых кислот, смол, восков, жирных кислот и их полимеров; содержат форменные элементы растений. **Бурые угли** — рыхлые или плотные образования, содержащие извлекаемые водной щелочью гуминовые кислоты. а) Битуминозные (витритовые) — плотные образования почти черного цвета, дающие 5—8% битума и до 15% первичного дегтя. б) Тощие — мало плотные бурого цвета образования, дающие 2—3% битума и низкий выход первичного дегтя.
В. Каменные угли	**1. Каменнные угли** — без блеска (матовые), содержат смолы, углеводороды и гумиты; не содержат гуминовых кислот; плохо спекаются. а) Битуминозые — выход первичного дегтя не менее 5%, содержание водорода не менее 4,5%. б) Тощие — выход первичного дегтя меньше 5% и содержание водорода — от 3 до 4%. в) Фузитовые — преобладает фузит. **2. Антрациты** — содержание водорода не более 2%.		**Каменные угли** — черные блестящие угли, содержащие мало экстрагируемых веществ и дающие хорошо сплавленный и вспученный полукокс. а) Витритовые — блестящие пекоподобные угли, дающие раковистый излом. б) Полосчатые угли — с преобладанием витрита; фузит отсутствует или почти отсутствует.	**1. Каменные угли** — не содержат гуминовых кислот; дают ничтожный выход дегтя. а) Витритовые — блестящие с раковистым изломом; фузита не содержат или почти не содержат. б) Полосчатые — с малым содержанием витрита и гумусовым дуритом; фузита мало. в) Фузитовые — с преобладанием фузита. **2. Антрациты**—содержат не более 2% водорода.

Главную массу применяемых для газификации топлив составляют горючие породы, имеющие разнообразные состав и свойства в зависимости от своего происхождения и возраста.

Из числа многочисленных попыток классификации топлив по различным признакам, по комплексу характеристик химического состава и физических свойств выделяется научная классификация Стадникова [160], повидимому охватывающая угли всех стран. По естественной классификации Стадникова (табл. 70), угли по своему происхождению разделяются на чистые сапропелиты, образовавшиеся из жирных кислот, входивших в состав жиров микрорастений (альг), чистые гумусовые, образовавшиеся из лигнина, восков и смол высших растений, и смешанные, в образовании которых принимали участие как жирные кислоты микрорастений, так и остатки высших растений или продуктов их аэробного изменения. В зависимости от преобладания той или иной части среди углей смешанного происхождения различают сапропелито-гумусовые и гумусово-сапропелитовые. Угли, содержащие много спор, называются кеннельскими.

В зависимости от изменения органического материала углей, т. е. их химического возраста, они разделяются на торфы, бурые и каменные угли.

Конечной стадией чисто сапропелитовых углей является буроугольная. Чисто сапропелитовые образования, пройдя стадию торфа, превращаются в бурые угли—богхеды, кеннельские сапропелиты и масляные сланцы.

Богхеды содержат остатки альг и не содержат или мало содержат спор; кеннельские сапропелиты содержат остатки альг и много спор; масляные сланцы содержат много смолы и включений нейтральных масел, сходных с нефтью. Эти угли характеризуются однородностью структуры в отличие от большинства каменных углей, содержащих разные прослойки (полосчатые угли).

В чисто гумусовых бурых углях различают разновидность — гумусовые кеннели и в каменных — антрациты, содержащие не больше 2% водорода.

Вещество каменных углей в зависимости от своего внешнего вида и происхождения носит название витрита, кларита, дурита и фузита. Витрит представляет собой черный, блестящий, кажущийся бесструктурным (в действительности обладающий, как в последнее время доказано с помощью сильных увеличений, клеточной структурой), уголь с раковистым изломом сапропелито-гумусового происхождения. Кларит представляет собой полублестящую разновидность; он состоит из полосок витрита и дурита с преобладанием витрита. Дурит является матовой темнобурой массой и состоит из сильно разложенной бесструктурной массы, содержащей в себе споры, смоляные тельца и мелкие растительные обрывки. Дурит—смешанного происхождения. Фузит образует матовые прослойки или вкраплен в другие части угля; эта часть углей гумусового происхождения часто сохраняет структуру материнского растения.

В противоположность вышеуказанной лигниновой теории происхождения гуминовых тел доказывается возможность образования гумусовых веществ также из клетчатки (целлюлозная теория).

Состав топлива

Топливо состоит из горючей и негорючей частей. Горючая часть состоит из органических (углеродистых) соединений, включающих в себе углерод, водород, кислород, азот и серу.

Из элементов, составляющих горючую часть топлива, горючими являются углерод, водород и сера. Углерод может быть связан с H, O, N и S, причем разрушение этих соединений сопровождается небольшим выделением тепла, и поэтому углерод при сгорании в любых соединениях дает почти одно и то же количество тепла. Что касается водорода, то для него имеет большое значение характер связи с другими элементами.

С увеличением возраста угля возрастает содержание в его горючей массе углерода и уменьшается содержание водорода и кислорода.

Негорючая часть топлива состоит из минеральных соединений и влаги. Если помимо состава горючей части задается содержание влаги и золы в применяемом топливе, то такое топливо называется рабочим.

В топливе часто содержится больше влаги, чем это соответствует природе и возрасту топлива; поэтому иногда характеризуют топливо тем содержанием влаги, которое оно удерживает при хранении в течение определенного промежутка времени в лаборатории (лабораторная влажность).

Влага, удерживаемая топливом на воздухе в обычных условиях хранения топлива, при установлении следовательно равновесия с паром окружающего пространства (воздушно-сухое топливо), называется гигроскопической.

Влага топлива связана отчасти с органическими веществами, отчасти же с минеральной составной частью. Связь влаги с минеральной частью имеет значение для зольных углей, содержащих много алюмосиликатов.

Влага находится в топливе в коллоидально связанном состоянии. Органические коллоиды могут быть обезвожены высушиванием при 100—105°, минеральные же коллоиды иногда требуют для полного обезвоживания температур в 200° и больше. Часть влаги — «капиллярная вода» — находится в капиллярах топлива. В топливе может также содержаться удерживаемая на его поверхности влага (внешняя влага) — лед, снег.

Абсолютно сухим топливом называют условно топливо, доведенное путем высушивания при 105° в атмосфере воздуха до постоянного веса.

Остаток, образующийся после полного сгорания топлива, называется золой. Он не тождествен с теми минеральными примесями, которые находились первоначально в топливе, так как при сгорании или газификации минеральная часть топлива подвергается под влиянием высокой температуры изменениям, и при этом меняется также содержание кислорода в органической массе. Поэтому вводят понятие о горючей массе топлива, учитывающее получение измененной минеральной части — золы. Таким образом горючая масса является беззольной и безводной частью топлива.

Горючую часть, как состоящую из органических соединений, называют органической частью топлива, если только не учитываются изменения, которые происходят с минеральной частью при горении и которые влияют и на органическую часть. Таким образом органическая часть представляет собой топливо без минеральной части и влаги.

В большинстве случаев по элементарному составу нельзя судить о природе угля, и последний подвергают дополнительным исследованиям: прокаливанию без доступа воздуха для определения содержания летучих и выхода кокса, обработке водой, органическими растворителями, кислотой и щелочью для извлечения органических веществ (85). Вещества, извлекаемые нейтральными органическими растворителями (бензолом, эфиром, спиртом и т. д.), носят название битумов.

Данные о составе и свойствах топлив СССР по Карелину и Коллегаеву приведены в табл. 71 (161).

Минеральная часть топлива

Минеральные вещества, входящие в состав углей, бывают двоякого происхождения; из материнского вещества углеобразователя (первичная зола) и нанесенные со стороны (вторичная зола). Минеральные вещества растений-углеобразователей при превращениях растительного материала претерпевают ряд изменений, при которых часть, состоящая из щелочных окислов и образующая легкорастворимые соли, вымывается водой.

В углях с высоким содержанием минеральных веществ последние являются результатом наносов ветром (песок в виде пыли) и водой (песок, карбонаты, глины, растворимые соли). Принесенные со стороны минеральные вещества, взаимодействуя с органической массой топлива, меняют состав минеральной части угля.

Указанные минеральные вещества или равномерно распределяются в топливе или же представляют собой механически примешанные частицы, тесно вкрапленные в топливо и трудно отделимые. Если примеси попали при добыче топлива, они могут быть в известной мере удалены с помощью соответствующей обработки топлива.

Важнейшие минеральные примеси: карбонаты, как например $CaCO_3$, $MgCO_3$ и $FeCO_3$, сульфаты — $CaSO_4$, Na_2SO_4, и $FeSO_4$, колчедан FeS_2, окислы железа, силикаты кальция, натрия, калия, марганца и алюминия и поваренная соль в небольших количествах.

Заключающиеся в топливе минеральные примеси при его сгорании или газификации, как уже выше указывалось, претерпевают известные изменения, главнейшие из которых заключаются в следующем:

1. Силикаты и гипс теряют свою конституционную воду.

2. Изменяется степень окисления железа: в окислительной атмосфере закись железа превращается в окись железа по уравнению:

$$4FeO + O_2 = 2Fe_2O_3;$$

в восстановительной атмосфере окись железа восстанавливается в зависимости от характера атмосферы в металлическое железо или в закись железа.

3. Карбонаты разлагаются с выделением CO_2 по уравнениям:

$$FeCO_3 = FeO + CO_2.$$
$$CaCO_3 = CaO + CO_2.$$
$$MgCO_3 = MgO + CO_2.$$

4. Пирит окисляется с образованием окиси железа и сернистого ангидрида:

$$4FeS_2 + 11O_2 = 2Fe_2O_3 + 8SO_2$$

или же разлагается по реакции:

$$FeS_2 = FeS + S$$

с образованием сероводорода в присутствии H_2 и H_2O (см. ниже) и сернистого газа в присутствии O_2.

5. Сернистый ангидрид, получающийся при окислении пирита и сгорании органической серы, взаимодействует с углекислым кальцием и кислородом по реакции:

$$2CaCO_3 + 2SO_2 + O_2 = 2CaSO_4 + 2CO_2.$$

6. Хлориды (поваренная соль) улетучиваются.

Чем больше в золе окислов железа, кальция и магния, тем ниже температура плавления золы. Степень плавкости золы оценивают соотношениями:

$$\frac{SiO_2 + Al_2O_3}{Fe_2O_3 + CaO + MgO} \text{ и } \frac{Al_2O_3}{SiO_2},$$

причем чем больше величина этих соотношений, тем выше температура плавления.

Сера угля

Наличие серы в топливе, несмотря на то, что при сгорании она выделяет некоторое количество тепла, нежелательно, так как сероводород, получаемый при газификации топлив, содержащих серу, и окислы серы, получаемые при сгорании сернистых соединений, вредно влияют на здоровье людей, разъедают металлические поверхности и т. д.

В ископаемых углях сернистые соединения бывают первичного и вторичного происхождения. Первичные образовались из сернистых соединений, которые входили в состав растений, служивших материнским веществом угля. Вторичные сернистые соединения получились путем изменения сульфатов, принесенных в скопления растительного материала со стороны.

При анализе топлива обычно определяют общее содержание серы в топливе, однако ее можно разбить на две части: 1) негорючую, или сульфатную, серу, входящую в состав минеральной части топлива в виде сульфатов: гипса — $CaSO_4$ и сернокислых металлов — $FeSO_4$ и $MgSO_4$, в которых сера уже связана с кислородом, и 2) горючую, или вредную, серу. В свою очередь горючая сера состоит из серы пиритной, входящей в состав серного колчедана FeS_2 (иногда в соединении с цинком, медью и другими металлами), и органической серы, входящей в

состав сложного органического вещества, из которого образовалось топливо. Содержание сульфатной серы обычно незначительно.

При сухой перегонке топлива сера распределяется между газами и смолой (летучая сера) и коксом. При сжигании топлива сера, находящаяся не в виде сульфата, частично или полностью окисляется в SO_2 или SO_3. Одновременно может произойти обогащение серой золы.

По Поуэлю и Парру сероводород в газе появляется в результате разложения пиритной серы и некоторой части органически связанной серы. По Ферстеру и Гейслеру органическая сера не принимает участия в образовании сероводорода; он образуется только из пирита. Изменения сернистых соединений могут быть сведены к следующим:

1. Разложение пиритной серы по реакции:

$$FeS_2 = FeS + S.$$

В присутствии водяных паров и водорода в газе элементарная сера образует сероводород. Также и при взаимодействии сульфида с водяным паром и водородом образуется сероводород по реакциям:

$$FeS + H_2O = FeO + H_2S$$

и

$$FeS + H_2 = Fe + H_2S.$$

При достаточном притоке кислорода сернистое железо образует сернистый ангидрид, переходящий в газ или реагирующий с водородом с образованием сероводорода.

2. Сульфатная сера в значительной степени восстанавливается углеродом до сульфидной по реакции:

$$RSO_4 + 2C = RS + 2CO_2.$$

Сульфид, образующийся при восстановлении сульфата, как и при разложении пирита, может в некотором количестве окисляться или дать новые количества сероводорода. Сульфид также реагирует с органическим веществом угля с образованием новых количеств органической серы. При повышении температуры сульфат распадается с образованием серного ангидрида.

3. Часть образовавшегося сероводорода может реагировать с минеральным веществом угля с образованием новых количеств сульфида.

4. Некоторая часть сероводорода реагирует с органическим веществом угля и образует небольшие количества сероуглерода и других летучих органических соединений серы.

Табл. 72 дает представление о постепенных превращениях различных форм серы при высокотемпературном коксовании.

Уже при 500° главная масса пирита угля превращается в сернистое железо и сероводород, и это превращение заканчивается при 600°; органическая сера отчасти удаляется из угля в виде сероводорода и других сернистых соединений, а отчасти вновь образуется из минеральной серы. Удаление органической серы из угля вследствие образования сероводорода и легколетучих органических сернистых соединений начинается (как и у пирита) при 300° и продолжается до конца перегонки. Однако потеря органической серы заметна только до 400°, а начиная с этой температуры, она маскируется образованием новых сернистых соединений вследствие реакции органической массы угля с серой, получающейся при распаде пирита. Эта последняя сера отчасти дегидрогенизирует образующиеся при распаде угля органические соединения, а отчасти вступает в соединение с высокомолекулярными нелетучими веществами и после их обугливания остается в коксе.

Восстановление сульфатов в сульфиды почти полностью заканчивается в пределах температур полукоксования.

При полукоксовании не образуется высокостойких содержащих серу соединений; поэтому в случае пропускания через полукокс газов, содержащих водород, сильно увеличивается выход сероводорода.

Таблица 72

Превращения серы угля под влиянием температуры

Формы серы	При температурах (в °С)					
	0	300	400	500	600	1000
Пиритная сера	1,75	1,75	1,42	0,31	0,00	0,00
Сульфатная сера	0,71	0,55	0,44	0,01	0,01	0,00
Органическая сера	1,79	1,6	1,51	1,70	1,87	1,81
Сульфидная сера (FeS)	0,00	0,13	0,44	0,93	0,82	0,84
Сероводород	0,00	0,19	0,39	1,20	1,39	1,44

Азот угля

Значительное содержание азота во многих топливах связано с повышенным содержанием его в болотных растениях, принимавших участие в образовании этих топлив, и падает с увеличением возраста топлива. Азот в топливе повидимому входит в состав сложных органических соединений, главным образом амидов, распадающихся при нагревании с образованием азотистых соединений углерода, из которых азот не может быть извлечен без содействия водяного пара или химических реагентов. Наиболее высоким содержанием азота отличаются торфы (до 3%); у сапропелитовых углей содержание азота обычно не превышает 1%, у гумусовых и смешанных — достигает 2%.

При сухой перегонке топлива азот частично выделяется в виде аммиака, азота и циана и частично остается в коксе. Выделение аммиака начинается при низких температурах и достигает максимума при 800°. При дальнейшем повышении температуры выделяющийся аммиак разлагается, что подтверждается опытами Майера и Альтмайера (1907), проведенными при трехчасовом нагревании кокса до различной температуры в потоке пара (табл. 73).

При топливах, содержащих больше летучих и дающих меньшие выхода кокса, получаются большие выхода аммиака, и в коксе удерживаются меньшие количества азота.

Таблица 73

Содержание азота (в %)

Уголь	Температура нагревания угля (в °С)			
	600	700	800	900
Уголь I:				
в коксе	72,4	70,1	65,2	62,1
» аммиаке	10,6	19,6	21,7	20,8
Уголь II:				
в коксе	82,33	80,83	78,21	74,18
» аммиаке	5,99	11,98	15,28	14,82

При увеличении продолжительности нагревания отщепление азота в виде аммиака идет в больших количествах. Полученный при быстром нагревании кокс при вторичном нагревании больше не отщепляет азота, что свидетельствует о наличии определенных, связанных с коксованием угля, химических реакций превращения азотистых соединений.

Сальманг нашел, что отношение $\frac{C}{N}$ в коксе остается неизменным в процессе газификации, но последующие опыты Монкегауза и Кобба показали, что часть азота может быть выделена нагреванием в потоке водорода или азота. Пекстон и Кобб изготовили несколько коксов в лаборатории и также применили кокс из коксовальной печи. Лабораторный кокс, изготовленный при 1100°, а также печной кокс дали постоянное отношение $\frac{C}{N}$ в течение всего процесса газификации в соответствии с наблюдениями Сальманга. Для кокса, приготовленного при более низких температурах, отношение $\frac{C}{N}$ возрастало и оставалось более высоким, чем начальная величина. Выделение азота протекало независимо от температуры и количества пара, причем большая часть азота выделялась в виде аммиака только в присутствии большого количества неразложенного пара и при температуре ниже 900°.

О влиянии водяного пара на выход аммиака свидетельствуют также опыты, произведенные Юнгом и Рамзеем над саарскими углями, подвергавшимися трехчасовой сухой перегонке и последующему воздействию водяного пара. Результаты опытов указывают на значительное увеличение выхода аммиака при подводе пара и предохранение паром получающегося аммиака от разложения.

В табл. 29 приведены данные произведенных Боне и Уиллером опытов получения аммиака при газификации.

Данные характеризуют увеличение выхода аммиака с увеличением примеси к воздуху пара; одновременно увеличивается содержание H_2 и CO_2 и уменьшается содержание CO.

Азот отщепляется не только в виде аммиака, но и в виде циана. Согласно опытам Фостера, при нагревании переходит в аммиак 14,5% всего азота, в циан — 1,56%; выделяется в виде элементарного азота 35,26%, и остается в коксе 48,68%. Для образования циана необходима температура не ниже красного каления. Присутствие кислорода и водяного пара сказывается неблагоприятно на его образовании, и в генераторном газе он отсутствует. При коксовании в циан переходит 1,5—4% всего азота.

Сухая перегонка топлива

Чем моложе топливо, тем больше летучих оно дает при сухой перегонке (табл. 74).

Летучие вещества состоят из газов и паров воды и смолистых веществ, которые могут быть сконденсированы при охлаждении газа.

Таблица 74

Количество летучих, выделяемых различными топливами при нагревании (на 100 частей сухого беззольного вещества)

	Дрова	Торф	Бурый уголь	Молодые каменные угли	Старые каменные угли	Антрацит
Остаток после перегонки	20	30	40	60	80	95
Летучие	80	70	60	40	20	5

При нагревании топлива вначале из него выделяется влага; при температурах 250—300° начинается значительное выделение газа и смол. Из газов вначале выделяются содержащие кислород газы — углекислота и окись углерода; при дальнейшем нагревании выделяются также метан, тяжелые углеводороды и водород. Летучие молодых топлив более окислены и содержат значительное количество CO_2. Летучие тощих углей и антрацитов содержат значительное количество H_2.

Выделение смол заканчивается при сравнительно низких температурах (450—500°). Основное количество газов выделяется при более высоких температурах.

При сухой перегонке топлива результат термического разложения его органической массы в значительной степени зависит от условий перегонки: конечной температуры, скорости ее подъема, давления в перегонном приборе и конструкции перегонного аппарата.

В случае перегонки при низких температурах (до 500—550°) получаемый маслообразный продукт называют первичной смолой, газ — первичным и твердый остаток — полукоксом.

В качестве приспособлений для определения выходов продуктов сухой перегонки при низкой температуре служат стеклянная реторта Грефе, алюминиевая реторта Фишера и для больших количеств топ-

лива — вращающаяся реторта Фишера. Иногда для сухой перегонки малых количеств топлив пользуются стеклянной трубкой Штрахе. Максимальные выхода смол дает алюминиевая реторта.

Перегонка при низких температурах дает максимальный выход смол. Для различных углей выход первичной смолы при перегонке в алюминиевой реторте колеблется в пределах 0—60%.

Наибольший выход первичной смолы дают сапропелиты, за ними следуют сапропелито-гумусовые угли, богатые битумами гумусово-сапропелитовые, и последнее место занимают гумусовые образования. Первые угли содержат много экстрагируемого битума и называются битуминозными, вторые — бедны битумами и называются тощими.

Для чистых сапропелитов выход первичной смолы падает с увеличением возраста угля. Для чистых гумусовых углей одинакового происхождения выход смолы сначала растет с увеличением возраста угля и, достигнув максимума, начинает падать, доходя почти до нуля у старых каменных углей и гумусовых антрацитов. У углей смешанного происхождения выхода первичной смолы меняются в зависимости от соотношения сапропелитовой и гумусовой составных частей [160].

Спекание угля

Разложение углей при нагревании протекает различно. Сапропелиты при нагревании до 350° сначала размягчаются и потом плавятся; при дальнейшем нагревании (начало — около 350—400°) идет бурное разложение угля с образованием смол, газа и полукокса. При дальнейшем нагревании получается спекшийся кокс. Влияние возраста на ход процесса разложения незначительно. У углей сапропелитового происхождения или же с преобладанием сапропелитовой составной части спекаемость обусловливается природой угля, битумы же не играют существенной роли при коксовании. Для углей с преобладанием гумусовой части спекаемость обусловливается битумами.

Францем Фишером было показано, что извлеченный из каменного угля бензолом под высоким давлением и при высокой температуре (250°) экстракт — общий битум — может быть разделен путем обработки петролейным эфиром на две части: маслянистый битум, растворяющийся в петролейном эфире, и твердое коричневое тело — твердый битум. Чем старее уголь, тем меньше содержит он общего битума и тем большую часть общего битума составляет маслянистый битум. Маслянистый битум сплавляет входящие в состав угля вещества в однородную массу и определяет свойство угля спекаться, твердый битум определяет свойство вспучиваться. Температура разложения твердого битума, являющаяся показателем начала вспучивания, увеличивается с возрастом угля. Если она совпадает с температурой, при которой уголь принимает пластическое состояние, то вспучивание будет наивысшим.

Для спекания угля требуется определенный минимум маслянистого битума. Чем моложе гумусовый уголь, тем раньше начинается процесс его разложения. Распад органического вещества молодого гумусового угля начинается при очень низкой температуре, одновременно с началом перехода битума в жидкое состояние. Основная

масса этих углей не плавится и не размягчается, и получаемый полукокс представляет собой рыхлую порошкообразную массу. Расплавленные битумы не растворяют гуминовых кислот и продуктов их разложения; поэтому даже при значительном содержании битумов в угле не получается сплавленной массы.

Угли смешанного происхождения занимают промежуточное положение между указанными двумя группами.

Необходимым условием для спекания угля является присутствие в угле определенного количества легко размягчающейся части. Последняя представляет собой совокупность веществ, из которых одни плавятся легко или даже являются жидкими при обыкновенной температуре (маслянистый битум), а другие плавятся при высокой температуре (500°). Жидкие или легкоплавкие вещества могут понизить температуру плавления высокоплавких, если последние способны давать растворы с жидкими и легкоплавкими составными частями углей. Для равномерного спекания необходимо, чтобы температура плавления размягчающейся части (витрита) лежала значительно ниже температуры разложения. При этом тугоплавкие составные части имеют достаточно времени для диспергирования в расплавившейся массе.

Таким образом процесс спекания углей смешанного происхождения может быть представлен в следующем виде.

При нагревании угля первоначально переходит в жидкое состояние битум, в котором растворяются более высокоплавящиеся части витрита; при дальнейшем повышении температуры по расплавлении витрита в полученном сплаве растворяются составные части дурита. После расплавления угля наступает его спекание.

При преобладании в витритовом угле сапропелитовой части и благоприятных количественных соотношениях для растворения высокоплавких частей легкоплавкими последние с повышением температуры все более размягчаются и при температуре 350—400° переходят в тестообразное, пластическое состояние, и в них растворяются неплавящиеся составные части. Если уголь долгое время находится при температуре пластического состояния, то из битумов отгоняются летучие составные части, и получается хрупкий полукокс. Если же быстро перейти через точку плавления битумов, то битумы, как и продукты их перегонки, разлагаются, выделяя углерод (отчасти в виде графита, уменьшающего реакционную способность кокса) или высокомолекулярные углеродные соединения с высоким содержанием углерода, и получается прочный кокс. Выделение газа из размягченной при температуре 300—500° массы угля ведет к образованию пор, от количества и тонкости которых зависит реакционная способность кокса.

Витритовые угли, содержащие большие количества гумусовых веществ, не плавящихся и не растворяющихся в битуме, неспособны давать спекшийся кокс.

Результат спекания у полосчатых углей зависит от состава витрита и количественного соотношения между витритом, дуритом, и фузитом. Витрит плавится при относительно низкой температуре и растворяет дурит в течение короткого периода до начала обугливания, что происходит в том случае, если витрит имеется в достаточном количестве и является сапропелитовым образованием [160].

Кусковатый полукокс получается из углей, обладающих способностью размягчаться и спекаться при низкой температуре.

Параметры коксуемости определяются по Л. М. Сапожникову (162) толщиной пластического слоя и усадкой при определенных условиях коксования. Нагревание угля производится в стальном стакане электрическим током, измерение толщины пластического слоя — иглой и измерение величины усадки — изменением положения штемпеля, давящего на верхнюю поверхность угля. Замеряемые величины регистрируются автоматически.

Исследование Л. М. Сапожниковым различных углей и их смесей позволяет сделать выводы, что толщина пластического слоя представляет собой аддитивное свойство и может быть вычислена по данным для отдельных компонентов смеси.

Состав и свойства продуктов полукоксования

Удельный вес полукокса зависит от веса исходного угля; наименьший удельный вес имеет торфяной полукокс, наибольший—каменноугольный. Сеть капилляров торфа переходит в полукокс и обусловливает его большую поверхность; плотный же каменноугольный полукокс имеет слабо развитую поверхность.

Состав полукокса определяется природой и составом исходного угля.

Полукокс молодых углей, отщепляющих много углекислоты и следовательно кислорода, содержит значительно больше углерода, чем исходный уголь; в составе же каменных углей и их полукокса такой разницы не наблюдается. Смол полукокс не содержит.

Период образования первичной смолы лежит почти для всех углей в одних пределах температур (350—500°). Состав первичной смолы меняется главным образом в зависимости от происхождения и отчасти от возраста угля.

Сапропелитовые угли дают много углеводородов жирного ряда; гумусовые угли — различное количество (меняющееся в зависимости от происхождения угля) фенолов, углеводородов жирного ряда, гидроароматических углеводородов; смешанные угли дают смолы, по составу занимающие промежуточное положение.

Как указывает Стадников, первичные смолы содержат насыщенные и ненасыщенные углеводороды как жирного, так и гидроароматического ряда, а из ароматических соединений — только гомологи. Первичные смолы не содержат нафталина и почти не содержат бензола и карболовой кислоты.

Первичная смола может быть источником легкого жидкого топлива для двигателей внутреннего сгорания, а также служит для изготовления пропиточных, смазочных и других веществ. Она редко применяется непосредственно; чаще перерабатывается на различные ценные продукты. В продуктах сухой перегонки древесины, а также торфов, содержащих растительные остатки, не полностью гумифицированные, содержится ряд продуктов, которые отсутствуют в продуктах перегонки других топлив, являющихся результатом более сильного изменения первоначального растительного вещества. Такими продуктами являются уксусная кислота, метиловый спирт, ацетон и др.

Чем ближе стоит топливо к каменным углям, тем меньше углекислоты в первичном газе. Первичный газ каменных углей смешанного происхождения в отличие от получаемого из гумусовых углей содержит много углеводородов, среди которых метан занимает первое место.

Состав и свойства продуктов коксования

При сухой перегонке топлива до более высоких температур (900° и выше) выход смолы уменьшается, выход же газов, особенно водорода и метана, увеличивается как вследствие разложения смол, так и вследствие разложения составных частей полукокса. Как уже было отмечено выше, спекшийся полукокс хрупок и при дальнейшем нагревании не дает прочного кокса. Лишь при соответствующем ведении процесса и непосредственно из спекающегося угля можно получить прочный кокс.

В зависимости от внешнего вида различают неспекшийся (порошкообразный или слипшийся) и спекшийся (сплавленный, вспученный, различной плотности) кокс. Содержание летучих характеризует степень обжига кокса. Хорошо обожженный кокс содержит 1—1,5% летучих. Содержание углерода в горючей массе кокса высоко—до 97%, содержание водорода и кислорода — в сумме 1,5—2%.

Пористость и удельный вес кокса зависят от его способности вспучиваться, обусловленной содержанием в угле твердого битума.

С увеличением температуры перегонки угля меняется характер смолы, в ней появляются нафталин, антрацен, бензол и другие соединения ароматического ряда. Эта смола является источником сырья для производства красок и фармацевтических препаратов. Она может быть разделена перегонкой на ряд кипящих при различных температурах масел с последующей их переработкой на бензол, фенол, нафталин, креозот, антрацен и т. д.

Остаток от перегонки смол — пек — может быть применен для брикетирования угольной мелочи, огнеупорных набоек в металлургических печах, фабрикации кровельного толя и непроницаемого для воды кирпича и для других нужд.

Кислород полукокса при дальнейшем нагревании полукокса выделяется в составе углекислоты, окиси углерода и паров воды (распад карбоксильных соединений). Азот полукокса выделяется частично в виде аммиака. Водород вначале выделяется главным образом в составе метана и при более высоких температурах — в виде свободного водорода.

Реакционная способность кокса и полукокса

Под реакционной способностью понимают поведение кокса или полукокса в отношении кислорода воздуха или чистого кислорода (воспламеняемость и горючесть), углекислоты и водяного пара (собственно реакционная способность).

Реакционная способность кокса обусловливается рядом факторов. Очень большое значение имеют величина реагирующей поверхности, свойства горючей массы и состав золы. Чем более развита поверхность, тем быстрее должны протекать реакции между коксом и газо-

образными веществами. Входящие в состав золы или специально вводимые соединения K и Na сильно повышают реакционную способность кокса, соединения Fe и Ca повышают ее значительно.

Имеют также значение температура перегонки и химический возраст топлива. Чем ниже температура разложения топлива, тем активнее полукокс; чем моложе исходный уголь, тем больше реакционная способность полукокса.

Древесный уголь состоит из аморфной массы с большим количеством пор и с трещинами в стенках пор. Самое вещество горючей массы древесного угля является весьма активным. Значительной активностью обладает также торфяной и буроугольный кокс.

Угольный кокс состоит из плотного серого вещества с металлическим блеском, часто покрытого слоем угля другого характера, представляющим собой или губчатую массу с сильно развитой поверхностью или графитоподобный углерод.

Образование губчатого угля является результатом разложения при сравнительно низких температурах органических соединений, чему способствует каталитическое действие железа, марганца и никеля. Особенно легко разлагаются углеводороды жирного ряда с образованием углерода и водорода, поэтому на поверхности кокса из углей, битум которых содержал много таких углеводородов, образуется много губчатого угля. При наличии в золе угля окислов железа на поверхности кокса образуется много губчатого угля даже при малом содержании в битуме угля алифатических углеводородов.

С повышением температуры активность кокса уменьшается.

Структура активного угля при нагревании его до 900° может измениться, и он может приблизиться по свойствам к инертному графиту, чему повидимому в известной мере препятствует наличие железа; при нагревании до 800° меняется и состав активного угля — из него выделяются летучие. Уменьшение активности кокса при повышении температуры может быть вызвано осаждением на нем графитоподобного угля, выделяющегося в результате разложения метана, что особенно наблюдается при 800°.

Падение активности кокса по мере повышения температуры его образования (от 900 до 1200°) объясняется взаимодействием активного угля, отлагающегося на поверхности кокса, с водородом, углекислотой и парами воды коксового газа и уменьшением его количества, а также отложением неактивного углерода в результате разложения метана.

Для промышленных установок, в которых поверхностный активный уголь быстро выгорает и продолжает гореть основная масса кокса, важны активность массы кокса и характер ее пористости.

Бунте определяет в качестве меры реакционной способности температуру воспламенения кокса в воздухе, под которой понимается температура начала интенсивного окисления, приводящего к воспламенению.

Он показал, что существует почти прямолинейная зависимость между температурой воспламенения и реакционной способностью.

Фишер определяет начало образования CO в потоке CO_2 в соприкосновении с угольной пылью. Начальная реакционная способность

Таблица 75

Реакционная способность углей

Вид топлива	Воздействие CO_2		Воздействие воздуха	
	% CO при 900°	Начало восстановления в °C	% CO при 450°	Температура воспламенения в °C
Древесный уголь	79,6	425	20,8	276
Газовый кокс из иоркширских каменных углей	44,2	550	12,7	520
Кокс из диргамских каменных углей (горизонтальные реторты)	28,9	550	12,1	487
Кокс из иоркширских каменных углей (вертикальные камеры)	17,2	700	11,2	539
Кокс из бисмарковских каменных углей (вертикальные камеры)	13,0	710	10,1	502
Металлургический кокс из углей «Эмма»	6,4	750	6,5	600
Ретортный графит	5,7	720	4,7	618

Таблица 76

Температуры воспламенения различных углеродистых материалов в чистом кислороде

Наименование материала	Температуры воспламенения образцов, обожженных при температуре (в °C)					
	Не кальцинированный	800°	1200°	1600°	2000°	2500°
Нефтяной кокс	470; 465	505; 500	605	615	655; 660	665; 670
Пековый кокс	560	—	580	590	630	665; 655
Антрацит шахты «Артем»	505; 500	520	575	660	675	670; 675
Антрацит шахты им. ОГПУ	505; 500	510	—	600	675	665
Антрацит кащеевский	500	—	—	610	665; 670	—
Антрацит шахты Воровского	485; 480	—	—	585	—	660
Древесный уголь	—	400; 410	—	—	515	575; 570
Шунгит (1 разн.)	—	515	—	—	—	—
Металлургический кокс	460	485	—	—	—	—
Электродный кокс	550	—	—	—	—	—
Торфяной кокс	180	—	—	—	—	—
Электроды:						
из графита Ачесона	—	—	—	—	—	560
из графита Сименса	—	—	—	—	—	620
из нефтяного кокса	—	—	520	—	—	—
Кудиновские угли:						
нагревательные стержни	—	—	545	—	—	—

не зависит от размера частиц, скорости нагрева и аппаратуры, а только от химических свойств углерода.

Копперс и др. определяют количество CO, образующейся при воздействии CO_2 на кусочки кокса при определенной температуре, например 900 или 950°, и скорости подачи CO_2.

Для подсчета восстановительной способности углерода служит выражение:

$$R\% = 100\,\frac{\%\,CO}{200 - \%\,CO}, \quad \text{или} \quad R\% = 100\,\frac{CO}{CO + 2CO_2}.$$

Для выяснения сравнимости различных методов Брендер-а-Брандис и Ле-Нобель [163] провели параллельное исследование воздействия воздуха и CO_2 на кокс. Они исследовали ряд образцов углерода в кусках и наблюдали начало восстановления CO_2, содержание CO в газах при 900°, количество CO_2, образующейся в потоке воздуха при 450°, и температуру воспламенения. При испытаниях по различным методам результаты были однородны. Отклонения были объяснены содержанием летучих в топливе и его составом, пористостью и структурой. Большое значение придается каталитическому воздействию золы (табл. 75).

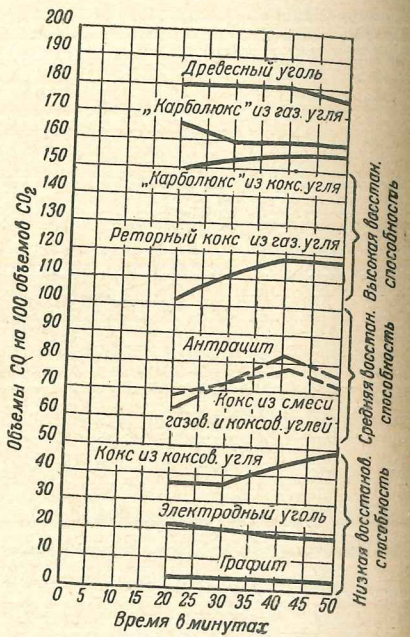


Рис. 166. Разложение углекислоты различными топливами

Также и по данным Кина, Тернера и Скота восстановительная способность кокса тем выше, чем ниже его начальная реакционная температура.

Различие реакционной способности различных коксов очень велико. В значительной мере помимо природы топлива влияют на реакционную способность характер и степень обжига (см. гл. I, а также табл. 75 и рис. 166).

Согласно исследованию Марковского [164] (табл. 76), обжиг выше 2000° уничтожает различие между различными углеродистыми материалами (кроме древесного угля) в отношении температуры воспламенения при пропускании кислорода, достигающей при этом предельной максимальной величины: 670°.

Тепловой эффект процесса разложения

Процесс термического разложения топлива может протекать с различным тепловым эффектом. По Штрахе и Грау [165] следует различать верхний и нижний пределы тепла, выделяемого при сухой перегонке.

Под верхним пределом понимается количество тепла, выделяемое или поглощаемое при сухой перегонке (теплота разложения) и при получении влаги и смол в жидком виде. Нижний предел дает соответствующее тепло, отнесенное к парообразным влаге и смоле.

Произведенные исследования над каменным и бурым углем, деревом и целлюлозой показали, что между верхним пределом теплоты сухой перегонки и содержанием кислорода в данном топливе имеется известная зависимость.

После нагревания целлюлозы до 300° процесс выделения газов идет без подвода тепла извне — за счет экзотермичности выделения углекислоты. Лишь по окончании этого процесса необходимо подводить тепло извне.

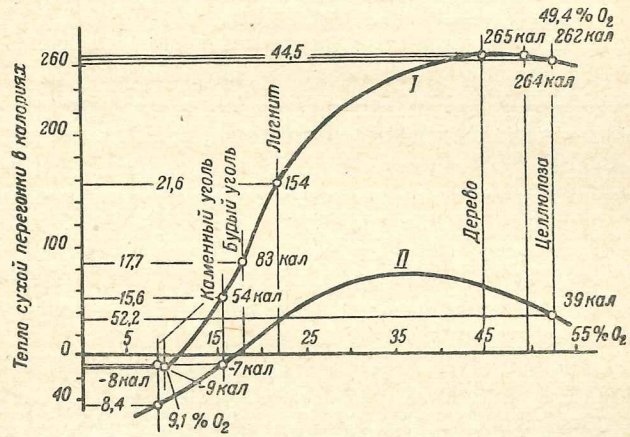


Рис. 167. Зависимость тепла сухой перегонки топлива от содержания в нем кислорода:

I—тепло по верхнему пределу, *II*—тепло по нижнему пределу

Торф и бурый уголь имеют положительные величины теплот разложения; для каменных углей это по большей части величина отрицательная.

Крайние пределы и средние данные величин теплот для различных топлив следующие: для дерева — от 118 до 366, в среднем 231, для бурого угля — от 25 до 98, в среднем 52, для каменного угля — от —57 до +12, в среднем — 8 *кал/кг*.

Зависимость между содержанием кислорода в топливе и величиной тепла сухой перегонки, по данным Штрахе и Грау, отнесенная к чистому углю, дана на рис. 167. При содержании кислорода выше 17% величина по нижнему пределу является положительной, при содержании ниже — отрицательной.

Для практики имеет значение нижний предел теплоты разложения, так как влага и смолистые вещества получаются в парообразном виде.

Величина по нижнему пределу отличается от величины по верхнему пределу на величину тепла парообразования конденсата.

По Штрахе и Фрону каменные и хорошие бурые угли требуют для перегонки длительного нагревания; низшие сорта бурого угля

и дерево обнаруживают положительную теплоту сухой перегонки. Это объясняется необходимостью более длительного нагревания для полного окончания газообразования топлив, содержащих мало кислорода.

Приведенные данные имеют значение для сухого топлива, доведенного до температуры, при которой идет интенсивное выделение газа. Сырое топливо требует во всех случаях для подсушки и сухой перегонки подвода тепла извне, причем особенно много тепла требуется для удаления влаги топлива.

Окисление и самовозгорание угля

Все угли, за исключением антрацита, на воздухе подвергаются окислению; при этом они становятся рыхлыми, обогащаются кислородом, понижают свою теплотворную способность и теряют способность спекаться. Некоторые угли при окислении разогреваются и самовозгораются. При повышении температуры скорость процесса окисления углей растет.

Самовозгоранию угля способствует наличие в нем пирита в присутствии влаги, а также измельченность угля.

Окисление угля протекает в несколько стадий. Уголь сначала медленно поглощает кислород, потом быстрее. При разогреве угля выше 100° окисление угля идет с выделением углекислоты и водяного пара.

Для каждого угля существует критическая температура, ниже которой самовозгорание не начинается.

Чем богаче топливо углеродом и старше, тем медленнее оно окисляется. Очень легко окисляется органическая масса торфа, хотя случаи самовозгорания торфа редки, так как окисление протекает интенсивно в период первой стадии сушки, когда торф очень влажен, и заканчивается к моменту обезвоживания торфа до воздушносухого состояния.

Бурые угли тоже легко окисляются на воздухе, причем могут разогреваться до точки возгорания. Сапропелитовые образования в силу своего химического состава и плотности структуры более стойки, чем гумусовые.

Теплотворная способность топлива

Теплотворная способность твердого и жидкого топлива измеряется количеством тепла, выделяющегося при сжигании единицы веса или объема данного топлива.

Если при учете тепла, выделяющегося при сгорании топлива, учитывать тепло, выделяющееся при конденсации паров воды, содержащихся в продуктах горения, то мы получим так называемую высшую теплотворную способность.

В промышленных установках влага обычно удаляется с продуктами горения в виде паров воды и следовательно бесполезно уносит содержащееся в них скрытое тепло испарения и тепло нагрева воды. Это тепло вычитают из высшей теплотворной способности, получая так называемую низшую, или полезную, теплотворную способность.

Теплотворная способность топлива может быть установлена опытным путем с помощью специального прибора — калориметра. При этом сжигают в специальной камере (бомбе) с кислородом известное количество топлива. Выделяющееся при сгорании навески топлива тепло нагревает воду сосуда калориметра, в котором помещается бомба. По повышению температуры воды судят о количестве выделившегося тепла [1].

Так как продукты горения в калориметре охлаждаются до низкой температуры, близкой к температуре окружающего воздуха, то влага из топлива и влага, получившаяся в результате горения водорода топлива, конденсируются и отдают тепло испарения и нагрева воде калориметра. Таким образом калориметром определяют высшую теплотворную способность топлива.

Низшую теплотворную способность можно получить, вычтя из высшей величину:

$$600 \cdot (W + 9H),$$

где W — количество влаги топлива,

H — количество водорода в топливе по его анализу (H *кг* водорода дают 9H *кг* воды),

600 — количество тепла в калориях, выделяемое при конденсации 1 *кг* пара.

Если опытным путем теплотворная способность топлива не установлена, а имеется анализ топлива, то теплотворная способность с известным приближением может быть определена по химическому составу расчетным путем с помощью некоторых формул.

В основу формул положено допущение, что элементы, входящие в состав органической массы, при сгорании выделяют столько же тепла, сколько его выделяется при сгорании элементов в свободном состоянии. Понижение теплотворной способности топлива вследствие наличия в нем кислорода учитывается допущением, что кислород связан с соответственным количеством водорода в воду.

Оба сделанные допущения определяют неточность основанной на них формулы Дюлонга, так как она не учитывает тепла образования органических соединений угля и связи кислорода с углеродом.

Для старых, хорошо разложившихся топлив эта формула достаточно точна.

Формула Дюлонга для высшей теплотворной способности:

$$Q_в = 81{,}4\,C + 342\left(H - \frac{O}{8}\right) + 22\,S,$$

где C, H, O и S — содержания элементов, выраженные в процентах.

Коэфициенты указывают тепло сгорания этих элементов.

Приведенное выражение для теплотворной способности получило

[1] При обычном сгорании топлива азот не принимает участия в процессе горения, а сера сгорает в сернистый газ. В условиях же сжигания в калориметрической бомбе в сжатом до 25—30 *ат* кислороде азот частично сгорает с образованием азотной кислоты, а сернистый газ сгорает в серную кислоту. Оба эти процесса сопровождаются выделением тепла, и поэтому в калориметрические определения теплотворной способности должны быть внесены поправки на теплоту образования азотной и серной кислот.

ряд видоизменений, связанных с подбором коэфициентов, дающих лучшее совпадение расчетных и опытных определений.

Чем моложе топливо, чем больше в нем кислорода, тем менее сходятся расчетные и экспериментальные определения.

Формула германских инженеров для низшей теплотворной способности при влажности топлива в $W\%$ имеет следующий вид:

$$Q_н = 81C + 290\left(H - \frac{O}{8}\right) + 25S - 6W.$$

Наиболее часто в СССР пользуются формулой Д. И. Менделеева, установленной с учетом поправок, которые внес опыт калориметрического определения теплотворной способности в теоретический подсчет на основании элементарного анализа.

Формула Д. И. Менделеева имеет следующий вид для высшей теплотворной способности:

$$Q_в = 81C + 300H - 26(O - S).$$

Для получения низшей теплотворной способности $Q_н$ из значения высшей следует вычесть 600 *кал* на каждый килограмм получившейся влаги, т. е.

$$600\frac{W + 9H}{100} = 6(W + 9H),$$

так как при наличии в топливе $W\%$ влаги и $H\%$ водорода в продуктах горения получается:

$$\frac{W + 9H}{100}\ кг \text{ влаги.}$$

Таким образом

$$Q_н = Q_в - 6(W + 9H) = 81C + 300H - 26(O - S) - \\ - 6(W + 9H) = 81C + 246H - 26(O - S) - 6W.$$

Наиболее приближающиеся к опытным результаты дает формула Вондрачека:

$$Q_в = (78{,}6 + 2{,}8\sqrt[4]{100 - C^г})C + 270\ (H - 0{,}10) + 25S.$$

Формула достаточно точна при содержании углерода в топливе до 90%.

Предложены и иные методы подсчета теплотворной способности топлива по его составу и по количеству кислорода, израсходованного на сжигание топлива.

Теплотворная способность по вышеуказанным формулам может быть определена лишь для твердых и жидких топлив.

Обозначения и пересчеты

Как указано выше, встречаются обозначения: органическая масса, горючая масса, сухая масса, лабораторное топливо, рабочее топливо. В зависимости от того, к какому топливу относят обозначения, проставляют соответствующие индексы.

Точно так же индексами обозначают верхний и нижний пределы теплотворной способности и тепловыделение по бомбе.

В табл. 77 приведены эти обозначения.

Таблица 77

Обозначения составных частей топлива и теплотворной способности

№ п.п.	Наименование	Рабочее топливо	Сухая масса	Горючая масса	Органич. масса
1	Влага общая (в %)	$W^р$	—	—	—
2	Зола истинная (в %) . . .	$A^р_и$	$A^с_и$	—	—
3	Зола лабор. (видимая) (в %)	$A^р$	$A^с$	—	—
4	Изменение веса золы	$R^р$	$R^с$	—	—
5	Углерод (в %)	$C^р$	$C^с$	$C^г$	$C^о$
6	Водород (в %)	$H^р$	$H^с$	$H^г$	$H^о$
7	Кислород (в %)	$O^р$	$O^с$	$O^г$	$O^о$
8	Азот (в %)	$N^р$	$N^с$	$N^г$	$N^о$
9	Сера общая (в %)	$S^р_{об}$	$S^с_{об}$	—	—
10	» сульфатная (минер.) (в%)	$S^р_а$	$S^с_а$	—	—
11	» летучая (в %)	$S^р_л$	$S^с_л$	$S^г_л$	—
12	» колчеданная (в %) . . .	$S^р_к$	$S^с_к$	$S^г_к$	—
13	» органическая (в %) .	$S^р_{орг}$	$S^с_{орг}$	$S^г_{орг}$	—
14	Тепловыделение в бомбе (в *кал/кг*)	$Q^р_б$	$Q^с_б$	$Q^г_б$	$Q^о_б$
15	Низшее тепловыделение по бомбе (в *кал/кг*)	$Q^р_{бн}$	$Q^с_{бн}$	$Q^г_{бн}$	$Q^о_{бн}$
16	Теплопроизводительность высшая (в *кал/кг*) . .	$Q^р_в$	$Q^с_в$	$Q^г_в$	$Q^о_в$
17	Теплопроизводительность полезная (низшая) (в *кал/кг*)	$Q^р_н$	$Q^с_н$	$Q^г_н$	$Q^о_н$
18	Летучие вещества без влаги (в %)	$V^р$	$V^с$	$V^г$	$V^о$

Иногда вводят индекс *л* для обозначения лабораторной пробы.

Часто состав топлива бывает задан не в том виде, в каком требуется. Например требуется знать состав рабочего топлива, а имеются состав горючей массы и зольность и влажность рабочего топлива; или имеется состав горючей массы, зольность сухого топлива и влажность рабочего топлива и т. д.

Для производства необходимых пересчетов состава топлива служат следующие формулы:

$$C^с\ (\text{то же } H^с, O^с, N^с, S^с) = \frac{C^г\,(100 - A^г)}{100}\ (\text{соответственно } H^г, O^г, N^г, S^г),$$

$$C^р = \frac{C^г\,(100 - W^р - A^р)}{100} = \frac{C^с\,(100 - W^р)}{100};$$

$$A^р = \frac{A^с\,(100 - W^р)}{100} = \frac{A^л\,(100 - W^р)}{100 - W^л};$$

$$V^р = \frac{V^г\,(100 - W^р - A^р)}{100} = \frac{V^с\,(100 - W^р)}{100} = \frac{V^л\,(100 - W^р)}{100 - W^л};$$

Для производства пересчетов теплотворной способности топлива служат следующие формулы:

$$Q_в^c = Q_в^г \frac{100 - A^c}{100} = Q_в^л \frac{100}{100 - W^л};$$

$$Q_в^р = Q_в^г \frac{100 - (W^р + A^р)}{100} = Q_в^c \frac{100 - W^р}{100} = Q_в^л \frac{100 - W^р}{100 - W^л};$$

$$Q_в^г = Q_в^л \frac{100}{100 - (A^л + W^л)}; \quad Q_н^г = Q_в^г - 6 \cdot 9H^г;$$

$$Q_н^c = (Q_в^г - 6 \cdot 9H^г) \frac{100 - A^c}{100} = Q_н^г \frac{100 - A^c}{100} =$$

$$= Q_в^г \frac{100 - A^c}{100} - 6 \cdot 9H^c;$$

$$Q_н^р = (Q_в^г - 6 \cdot 9H^г) \frac{100 - (W^р + A^р)}{100} - 6W^р =$$

$$= Q_н^г \frac{100 - (W^р + A^р)}{100} - 6W^р = Q_в^г \frac{100 - (W^р + A^р)}{100} - 6(9H^р + W^р);$$

$$Q_н^р = (Q_в^c - 6 \cdot 9H^c) \frac{100 - W^р}{100} - 6W^р = Q_н^c \frac{100 - W^р}{100} - 6W^р =$$

$$= Q_в^c \frac{100 - W^р}{100} - 6(9H^р + W^р) = Q_в^р - 6(9H^р + W^р).$$

2. ПРИМЕНИМОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ ТОПЛИВ ДЛЯ ГАЗИФИКАЦИИ

Газификации подвергают и естественное и искусственное топливо: дрова, древесные отбросы, торф, бурый уголь, каменный уголь, антрацит, сланец, брикеты и кокс.

Свойства газифицируемого топлива имеют решающее значение для процесса газификации. Из отдельных свойств и особенностей топлива имеют значение для газификации размер кусков топлива и стойкость, количество и состав продуктов сухой перегонки, содержание и свойства золы, количество влаги, свойства топлива при нагревании и свойства получаемого кокса.

Размер кусков топлива

Равномерность размера кусков топлива имеет очень большое значение для процесса газификации. Малые куски газифицируются быстро, большие — медленно, и при неравномерности кусков топлива большие куски доходят до колосников, плохо выгорев, увеличивая потерю горючего в очажных остатках.

При наличии пыли в слое топлива могут оказаться трудно пронизываемые для дутья участки, в результате чего часть топлива достигает колосников плохо выгоревшей и увеличивается потеря в провале. Пыль также уносится с газами.

При крупных кусках топлива реакционная поверхность его невелика, и приходится увеличивать слой топлива для получения хорошего газа. Таким образом, чем крупнее топливо, тем выше слой его, и наоборот.

При очень мелком топливе увеличивается сопротивление слоя. Вследствие увеличения поверхности соприкосновения газов и угля слой топлива поддерживают низким, однако необходимость повышения давления остается, и с этим связан ряд недочетов режима: образование частых прогаров, значительный унос топлива, необходимость продолжительной и частой шуровки.

Уголь должен быть хорошо отсортированным. Размер кусков угля, антрацита и кокса может вообще лежать в пределах 6—75 *мм*, с тем чтобы каждая партия состояла из кусков возможно более равномерного размера в указанных выше пределах, например 35—75, 25—50, 12—25 и 6—12 *мм*.

Для углей, газифицирующихся в генераторах со швельшахтами (бурые угли), размер кусков во избежание большого сопротивления слоя не должен быть ниже 25 *мм*. Наиболее благоприятный размер кусков топлива лежит в пределах 25—50 *мм*. При антрацитовом топливе пригодны и некоторые сорта АС и АЗ.

Кусков, не соответствующих по размерам принятым пределам, должно быть не более 15—20%. Несоблюдение указанного условия ухудшает режим (производительность, состав газа, выжиг и унос). Стойкое топливо, как например антрацит и некоторые каменные угли, если оно прибыло хорошо сортированным, может при малом содержании мелочи направляться непосредственно в газогенератор со склада без промежуточного грохочения; топлива, менее прочные, должны обязательно подвергнуться грохочению на генераторной станции, и в этом случае уменьшение содержания мелочи в прибывающем угле уменьшает отсев, получаемый на генераторной станции.

Отсев может быть использован в смеси с более крупными кусками при раздельной подаче в генератор и наличии специальных устройств, равномерно распределяющих топливо слоями по сечению (см. гл. II). Топливо со значительным содержанием мелочи в случае его спекаемости используют с успехом в генераторах с автоматическими шуровочным приспособлениями в виде лома и вращающейся шахты (см. ч. 2, гл. IV).

Влияние содержания мелочи в топливе на процесс газификации может быть продемонстрировано на примере с челябинским углем, газифицировавшимся в генераторе диаметром 2,6 *м* с вращающейся решеткой и охлаждающим кожухом (166).

1) При угле с размером кусков в 0—37 *мм* с ситовым анализом: 0—5 *мм* — 38%, 5—10 *мм* — 23%, 10—22 *мм* — 26% и 22—37 *мм* — 13% — производительность генератора составила 8—10 *т/сутки*, причем содержание горючего в шлаке было равно 29,27% от веса шлака, теплотворная способность газа была низка — 1100 *кал/м*³, режим был неустойчив и наблюдались сильное шлакование и прогары.

2) При угле с размером кусков в 5—37 *мм* с ситовым анализом: до 5 *мм* — 26%, 5—10 *мм* — 32%, 10—22 *мм* — 32% и 22—37 *мм* — 10% — результат работы был такой же, как и в первом случае.

3) При газификации угля размером в 10—37 *мм* с ситовым анализом: 0—5 *мм* — 14%, 5—10 *мм* — 17,5%, 10—22 *мм* — 47,5% и 22—37 *мм* — 21% — производительность генератора составила 23—25 *т*, содержание горючего в шлаке понизилось до 7% и теплотворная способность газа возросла до 1450 *кал/м*³.

4) При газификации угля размером 10—50 *мм* с ситовым анализом: 0—5 *мм* — 14%, 5—10 *мм* — 15%, 10—22 *мм* — 51% и 22—50 *мм* — 20% — были получены такие же результаты, что и в третьем случае.

5) При угле крупном — 10—100 *мм* — с содержанием кусков в 0—10 *мм* — 21%, 10—22 *мм* — 25% и 22—100 *мм* — 54% — показатели были хороши, но выжиг ухудшился и содержание углерода в шлаке составило 22%.

Для водяного газа содержание мелочи в топливе должно быть снижено до 5%, так как все недочеты в этом случае выявляются резче. Размер кусков топлива для водяного газа обычно применяется в пределах 50—100 *мм*; возможно использовать также куски размером в 25—50 *мм*.

Мелкое топливо с успехом можно газифицировать в конструкциях, позволяющих избежать местных прорывов дутья и, следовательно, — большого уноса, шлакования и прогаров. Удовлетворительная газификация достигается равномерными распределением дутья и загрузкой топлива, автоматическим шурованием слоя и применением специальных конструкций по типу Винклера.

Если мелкое топливо имеет равномерный размер зерна, то его удается довольно хорошо газифицировать даже в примитивных генераторах со ступенчатой решеткой и обычных генераторах с вращающейся решеткой, однако производительность этих генераторов при этом топливе несколько меньшая, чем при более крупных топливах.

Лучшие результаты газификации мелких топлив дают генераторы высокого давления со специальными решетками, снабженными мелкими отверстиями взамен обычных щелей (генераторы высокого давления Керпели и др.). При этих решетках улучшается распределение воздуха по сечению.

Хорошие результаты при газификации мелких топлив дают приспособления для равномерного распределения топлива по сечению (генератор Вельмана-Галуша, распределительное устройство Копперса; см. гл. II).

Если топливо настолько физически нестойко, что даже после сортировки разрушается при транспортировке, в загрузочном аппарате и при шуровании и опускании в генераторе, то при этом наблюдаются все недочеты, связанные с применением кусков неравномерного размера, в частности более быстрая газификация мелких кусков и большой недогар больших кусков, неравномерное распределение кусков по сечению генератора, прогары у стен и недогар топлива, лежащего в середине генератора, ухудшение качества газа, увеличение шлакования, уноса и т. д.

Дрова газифицируются в виде поленьев 1,5 *м*, 0,75 *м* (аршинка), 0,5 *м* (швырок), а также в виде чурки (300—350 *мм*). Для увеличения интенсивности газификации древесины в последнее

время ее применяют в виде щепы, для чего дрова измельчают дробилками—чиперами.

Отбросы лесного и лесопильного хозяйств — пни, хворост, сучья, решетину, горбыли и т. д. — особенно успешно газифицируют в виде кусков, нарезанных специальными ножницами.

К достоинству применения мелких, однородного размера кусков древесины относится также упрощение механизации транспорта и возможность использования более влажной древесины.

Торф газифицируют в виде торфин размером примерно 300 × 120 × × 75 *мм*. Особых неудобств для газификации этот размер кусков не представляет, хотя повидимому применение кусков меньшего размера должно благоприятно отражаться на ходе процесса газификации.

Применение рядового угля значительно ухудшает работу генератора в отношении производительности, качества газа и содержания горючего в провале.

Хорошим топливом в смысле размера кусков являются прочные, не распадающиеся при нагревании брикеты.

Бурые угли и некоторые сорта каменных (длиннопламенные) легко распадаются при транспортировании. Это заставляет применять их у мест добычи, иметь лишь небольшие запасы у генераторных станций, оборудовать склады приспособлениями для сортировки, предусматривать получение с рудника сортированного топлива и вместе с тем обеспечивать сбыт отсеянной мелочи ввиду распадения топлива на месте хранения.

Иногда неспекающиеся угли смешивают со спекающимися для уменьшения уноса из генератора. Из применяемых для газификации каменных углей спекшийся кокс дают газовые угли. При не слишком большой спекаемости с ней можно с успехом бороться путем применения автоматических шуровочных приспособлений.

Отдельные сорта углей, применяемых для газификации, обладают различной стойкостью. Бурые угли (подмосковные и челябинские) легко выветриваются и распадаются. Отсеянный через грохот в 25 × × 25 *мм* челябинский уголь дал отсев перед применением около 20%, а в бункере в нем вновь оказалось 20—25% мелочи ниже 25 *мм*. При месячном лежании челябинского угля в летнее время разложился слой угля толщиной в 20 *см* и отсев мелочи через сито в 25 × 25 *мм* составил 51% [167].

Рядовой подмосковный уголь [168], содержавший более 50% штыба, после отсева мелочи через сито в 25 × 25 *мм* в бункере у генератора дал вновь около 30% мелочи размером меньше 25 *мм*.

Каменные угли более прочны и стойки, однако не все.

Сравнительно легко разрушаются лисичанский и журинский угли. Лисичанский уголь, с успехом применявшийся в генераторах обычных конструкций, недостаточно хорош в генераторах с автоматическими шуровочными приспособлениями, давая до 5% и больше уноса пыли, что обусловливает большую потерю и препятствует использованию горячего газа из этого угля [169].

Более прочны при хранении и транспорте антрациты. Антрацит АГ, полежавший значительное время на складе, содержал при загрузке без всякого грохочения 22% кусков размером ниже 25 *мм*, в том числе

только 7% размером ниже 12 *мм*. Антрацит АК, пролежавший некоторое время на складе, содержал при загрузке в генератор без всякого грохочения 17,4% кусков размером ниже 30 *мм*, в том числе 5% кусков размером ниже 12 *мм*.

Боково-хрустальный антрацит, пролежавший на складе 6 месяцев, не претерпел видимых изменений и не подвергался грохочению, так как не содержал мелочи и был однороден по величине кусков (170).

Целый ряд антрацитов растрескивается при нагревании, причем количество уноса при этом доходит до 12% от веса топлива (171).

Кокс прочен при хранении и транспорте.

Из вышеуказанного следует, что газогенераторные станции должны снабжаться возможно более прочными и стойкими сортами углей, что должно улучшить их использование в генераторах, уменьшить отсев, обычно являющийся баластом, и дать возможность отказаться от грохочения на самой генераторной станции.

Влажность топлива

Подсушка топлива в генераторе заканчивается в верхних слоях, и в раскаленную зону топливо попадает совершенно сухим.

Чем влажнее топливо, тем выше должна быть зона подсушки и тем выше должен быть весь слой топлива. При низком слое и влажном топливе раскаленная зона низка и трудно поддерживать ровный и хороший режим. Удаление золы и шуровка при низком слое легко влекут за собой нарушения процесса, обусловливающие потерю зоны, образование каналов и прогары.

Перешедшая из топлива в газ влага ухудшает его качество. При очень большой влажности топлива генераторный газ получается холодным и влажным. Влага повышает вес транспортируемого топлива и опасность его смерзания, понижает теплотворную способность газа, при сгорании отнимает тепло на свой нагрев, понижая температуру горения газа, и уносит из места сгорания газа тепло. Влажный газ подвергают осушке путем его охлаждения, причем с увеличением влажности газа увеличивается расход охлаждающей воды.

Очень влажные топлива, как например дрова, торф, перед употреблением подсушивают, применяя естественную сушку, заключающуюся в укладке на продолжительное время на воздухе штабелей дров или торфа. Влажный уголь целесообразно перед употреблением некоторое время продержать для сушки под навесом для приведения в воздушносухое состояние.

Искусственную сушку топлива применяют редко из-за ее дороговизны. Однако при наличии дешевого отбросного тепла, например отходящих газов печей, такая сушка может быть проведена.

Для получения сносного по качеству газа, влажность топлива не должна быть выше 50—55% [1]. При большей влажности тепла поднимающихся газов нехватает на подсушку и перегонку топлива, и вверху генератора могут в этом случае конденсироваться смола и влага, что ухудшает работу генератора или вызывает его заглушение. При этом

[1] Считая на беззольное топливо.

возникают перекосы зон, падает производительность генератора, ухудшается состав газа и увеличиваются потери в остатках.

В случае водяного и двойного газов топливо не должно содержать влаги выше определенных, довольно низких значений во избежание ухудшения процесса газификации и увеличения потерь.

Из применяемых для газификации топлив значительной влажностью обладают дрова, торф и бурый уголь. Последний помимо высокого процента влаги (20—35%) содержит также большое количество золы, что ухудшает его свойства как топлива для газогенераторов. Влажного топлива газифицируют обычно большее количество на единицу площади сечения генератора, нежели сухого; однако при пересчете на абсолютно сухое топливо оказывается, что при более сухом топливе газифицируется больше сухого вещества, нежели при влажном.

Зольность топлива

Наличие в топливе золы вызывает потери горючего в золе и необходимость в чистке генераторов, которая плохо отражается на равномерности процесса газификации. Особенный вред приносит зола при ее легкоплавкости. В этом случае в зоне высоких температур зола плавится, заливает колосниковую решетку и нарушает равномерность подвода воздуха.

Расплавившаяся зола приплавляется к огнеупорной футеровке шахты, образуя настыли. При очень высокой температуре зола сплавляется с футеровкой, огнеупорность последней понижается, и она расплавляется.

Шлак обволакивает частицы топлива, препятствуя их сгоранию, и таким образом уменьшает выход газа и увеличивает потерю с горючим в провале. Шлак спекается в большие комья, уменьшающие полезное сечение генератора и создающие пустоты, через которые проходит воздух, сжигающий газ. Вязкие шлаки иногда образуют зависающие своды, под которыми получаются пустоты.

Большие неприятности в смысле шлакования причиняет наличие в топливе примесей пирита. Он оплавляет остатки, образуя большие комья шлака, препятствующие равномерной газификации.

Зола представляет собой механическую смесь различных соединений с различной точкой плавления. Составные части, имеющие наиболее низкую температуру плавления, расплавляясь, являются цементом для остальной более огнеупорной части. В результате образуется в зависимости от количества расплавившейся части золы более или менее губчатый шлак. Таким образом нельзя говорить об определенной температуре образования шлака.

Плавкость золы характеризуется или температурой полного расплавления ее или температурой размягчения. Для характеристики плавкости золы пользуются данными о температурах начала деформации, размягчения и плавления.

При исследованиях плавкости золы, имеющих большое практическое значение, чрезвычайно важна атмосфера, в которой происходит нагревание золы. Окись железа в золе восстанавливается в металлическое железо при сильно выраженной восстановительной атмосфере

и в закись железа — при умеренно восстановительной. Смеси, содержащие окислы железа в присутствии силикатов, имеют более низкую температуру плавления в том случае, если железо находится в закисной форме, и более высокую, когда оно находится в форме металлического железа или в виде окисей. Для того чтобы определяемая точка плавления имела практическую ценность, необходимо знать состав атмосферы, при которой производятся опыты. Рекомендуется определение в слабо восстановительной атмосфере, что соответствует условиям работы генераторов. Более высокая температура плавления получается в окислительной и сильно восстановительной атмосфере, более низкая — в полувосстановительной. Переход до жидкого состояния происходит для различных зол в различных интервалах температур.

Температура плавления золы (жидкое состояние) выше 1200° дает возможность достигнуть хорошей производительности и ровного и спокойного хода генератора. С понижением температуры плавления золы технические показатели газификации ухудшаются — падает интенсивность газификации и ухудшается качество газа.

Большое значение имеет и температура размягчения шлака, так как размягченный шлак, слипаясь, нарушает режим.

В качестве минимальной температуры, при которой газификация протекает удовлетворительно и которая характеризует температуру начала деформации золы, можно принять 1000°.

Шлакообразование вызывает необходимость в тщательной шуровке, особенно для предупреждения нарастания слоя шлака.

При сильном шлаковании понижают температуру раскаленной зоны генератора введением водяного пара, благодаря чему шлаки разрыхляются. Заменяют также футеровку на уровне раскаленной зоны водяной рубашкой. Холодные стенки рубашки устраняют возможность приваривания золы, упрощают уход за генератором и дают возможность интенсифицировать его ход.

При слишком низкой температуре плавления золы (около 1000°) газификация топлива в генераторах с кусковым золоудалением является уже мало рентабельной; эти топлива могут применяться лишь в генераторах с выпуском жидких шлаков.

Ручное удаление золы при очень зольных топливах доставляет много неудобств. Применение вращающихся колосниковых решеток с механическим удалением золы значительно облегчает уборку золы.

Газификация многозольных топлив в генераторах с кусковым золоудалением затруднительна; при содержании золы в 50% трудно поддерживать равномерный ход генератора, что и ставит предел промышленному применению многозольных топлив.

Вообще следует отметить, что газификация топлив с содержанием золы около 50% в генераторах с кусковым золоудалением и вращающейся решеткой дает удовлетворительный результат лишь в случае достаточной тугоплавкости золы. При этом работают со сравнительно высоким слоем золы, что способствует хорошему распределению и подогреву первичного воздуха.

Древесина имеет низкое содержание золы — 0,3—2%. Зола эта тугоплавка. Повышение содержания золы и легкоплавкость ее имеют

место при загрязнении дров внешними примесями — песком и илом, что может произойти при доставке дров сплавом. Древесная зола сильно щелочная и разъедает футеровку.

Торф имеет различную зольность в зависимости от характера разрабатываемого торфяника. Верховые болота содержат золы 3—5%; переходные — 5—6% и низинные — 6—10%. Для газификации применяются преимущественно малозольные сорта. Торфяная зола часто легкоплавка.

Бурый уголь является более зольным. Содержание в подмосковном угле золы составляет 13—25%. Несмотря на тугоплавкость золы (1450—1500°), уголь все же выявляет часто склонность к шлакообразованию, связанную с наличием в нем серного колчедана. Потеря горючего в шлаках при газификации подмосковного угля значительна вследствие наличия в нем прослоек глины, обволакивающих частицы кокса.

Челябинский бурый уголь имеет золу несколько более легкоплавкую. Содержание золы в нем — 15—25%. Потеря горючего с золой челябинского угля значительна.

Богословский уголь имеет зольность в 8—12%. По литературным данным зола его легкоплавка, однако имеются указания на тугоплавкость золы отдельных его сортов.

Применяемые каменные угли и антрациты имеют различное содержание золы с различной плавкостью. Обычно применяются сорта с содержанием золы в 10—20%, иногда и с более высоким.

Для лисичанского угля марки Д и бежановского Г показатели различны: они часто дают значительное шлакование. Данные по гришинским углям характеризуют его как благоприятное для газификации топливо.

Болдыревский уголь при испытании выявил себя как топливо с легкоплавкой золой [172]. Хорошие результаты дает журинский уголь [125].

Весьма благоприятны в отношении плавкости свойства золы боково-хрустального антрацита АК, характеризующиеся температурами начала деформации, размягчения и жидкоплавкого состояния в 1120, 1220 и 1270° [170, 171]. Этот антрацит дает прекрасные показатели в части производительности, выжига остатков и состава газа.

Донецко-грушевский антрацит марок АК, АМ и АС (шахта «Артем») с температурами размягчения и жидкоплавкого состояния для АК в 1050 и 1150°, для АМ — в 1070 и 1290° и для АС — в 1130 и 1310° показал в генераторе без охлаждающего кожуха при газификации АК, содержавшего около 7% золы, удовлетворительную производительность и плохой выжиг и при газификации АМ и АС — плохой результат вследствие сильного шлакования и зависания шлаков.

Антрациты АМ и АС Снежнянского рудоуправления с температурами размягчения и жидкоплавкого состояния для АМ в 1090 и 1200° и для АС — в 1055 и 1260° газифицируются несколько лучше предыдущих сортов, однако АС значительно хуже АМ в отношении выжига остатков (10 и 28%) и шлакования. Антрациты АМ и АС Боково-хрустальского рудоуправления с температурами размягчения и жидкоплавкого состояния для АМ в 1120 и 1290° и для АС — в 1150

и 1340° газифицируются без особого шлакования, хотя выжиг углерода плохой (20 и 28%), причем АМ газифицируется лучше АС.

Очень хорошо себя проявил, как топливо для газогенераторов, антрацит Несветаевского пласта

Для топлива, применяемого для получения водяного газа, низший предел допустимой температуры плавления должен быть повышен.

Из топлив, намечаемых к газификации, наибольшей зольностью обладают сланцы (40—50%). Их зола часто легкоплавка.

Как уже указывалось, имеют также значение гигроскопичность и другие свойства золы. Некоторые золы, особенно бурых углей, гигроскопичны и втягивают воду из водяных затворов к раскаленной зоне, охлаждая ее и препятствуя выжигу остатков, а некоторые золы, особенно сланцевая, образуют с водой цементообразную твердую, трудно удалимую массу. В этих случаях применяют сухие затворы.

Неудовлетворительное влияние золы в смысле уноса горючего, помех от шлакования и связывания с водой не наблюдается при применении генераторов с жидким шлакоудалением. Добавкой флюсов могут быть достигнуты достаточная легкоплавкость шлака и его текучесть, а также требуемый состав шлака, допускающий его целесообразное использование в качестве побочного продукта. В этом случае допустима большая зольность топлива (подробнее — см. гл. II).

Свойства топлива при нагревании

Пригодность топлива для газификации и достоинства его в значительной мере определяются свойствами его при нагревании. Состав и выход газов сухой перегонки влияют на теплотворную способность и состав газа. Топлива с высоким содержанием летучих дают газ со значительно более высокой теплотворной способностью, чем топлива с малым содержанием летучих.

Выделяющиеся при нагревании топлива смолистые вещества в случае значительного их количества и сжигания с газами повышают пирометрический эффект горения газа и придают пламени сильно лучеиспускающий характер. Ряд продуктов сухой перегонки — смолы, уксусная кислота, сероводород и т. д. — может быть использован самостоятельно, что уменьшает стоимость газа и дефицит в остро необходимых продуктах.

Пригодность или непригодность топлива для газификации и качество последней могут характеризоваться и свойствами кокса из топлива. Кокс может сильно спекаться, что препятствует газификации; он может быть более или менее активным, что влияет на производительность генератора и состав газа, и т. д.

Некоторые топлива (угли и антрациты), как уже указывалось выше, обладают способностью распадаться при нагревании, что значительно ухудшает процесс газификации. Особенно склонны к распаду антрациты с повышенным содержанием водорода. Пористость их во время выделения летучих мала, что вызывает растрескивание. Хорошим, нераспадающимся топливом проявил себя термоантрацит.

Характер нагрева кусков топлива зависит от конструкции генератора, вида топлива и режима. В генераторах со швельшахтами загруженное топливо в течение 3—4 час. прогревается до 500°. В генераторах без швельшахт очень влажные топлива, как например подмосковные угли, в течение 2—3 час. прогреваются до 500°; менее влажные, как например челябинские, попадают сразу в слой с температурой 250—300° и прогреваются до 500° в течение 1—2 час.; топлива сухие (каменные угли, антрацит и кокс) сразу попадают в слой с температурой 450 — 700° и в течение очень малого промежутка времени, измеряемого минутами, прогреваются до температуры 500° и выше.

Выход смолы при газификации несколько меньше выхода, получаемого при лабораторном исследовании по Грефе (при швельшахтах — 85—90%, в обыкновенных генераторах — 50—60%).

Для получения первичной смолы применяют генераторы со швельшахтами, в которых обеспечивается проведение сухой перегонки при низких температурах и устраняется сдвиг зон, а следовательно и перегрев смолы.

При значительной влажности топлива (особенно это относится к очень сырым бурым углям) рекомендуется уголь несколько подсушивать, так как тепла, приносимого генераторным газом из зоны газообразования в верхнюю часть генератора, недостаточно, чтобы произвести и перегонку и сушку угля, т. е. нагреть выходящие из генератора газы до такой температуры, при которой они могли бы унести из печи пары смолы.

Зона подсушки при влажном топливе сильно увеличивается и смола выделяется при этом в частях, имеющих высокие температуры, что ухудшает ее состав. Вследствие этого правильный ход перегонки очень влажного топлива невозможен.

Качество смолы ухудшается вследствие присутствия в ней частичек топлива и сажи. Последняя появляется из-за разложения углеводородов при перегреве газа в местах высокой температуры. Во избежание распадения смолы необходимо, чтобы топливо нагревалось постепенно и чтобы выделяющиеся смолы удалялись, не подвергаясь перегреву. Следует учитывать не только необходимость низкой температуры перегонки, но и скорость выделения смолы.

Середина куска топлива отстает в нагреве от внешних слоев, и продукты сухой перегонки из внутренних частей куска попадают в область более высоких температур и разлагаются. Чем равномернее прогрев куска топлива, тем больше выход смол. Период образования первичной смолы для всех топлив лежит в одних пределах температур: 350—500°. Быстрое удаление из перегонной аппаратуры паров образующейся смолы способствует уносу значительно большего количества смол до их разложения.

Хорошая смола получается и в генераторах Монда, имеющих в целях увеличения выхода аммиака холодный ход. В этих генераторах при достаточной высоте слоя топлива может получиться продукт, вполне аналогичный первичной смоле.

Отличие в химическом строении первичной смолы и смолы, получаемой при более высоких температурах из каменного угля, не наблю-

дается столь значительно при газификации в генераторах без перегонных камер более молодых топлив — бурого угля, торфа и дров. Это следует приписать тому, что технические процессы перегонки бурого угля и торфа протекают при температурах не доходящих до температур, способных вызывать образование большого количества ароматических соединений в смолах.

Для процесса газификации имеет большое значение реакционная способность кокса и полукокса из данного топлива.

Остаток после перегонки древесины — древесный уголь — обладает большой активностью. Большой активностью обладает также торфяной кокс.

Остаток от перегонки бурого угля обладает меньшей активностью, чем древесный уголь и торфяной кокс, но большей, чем каменноугольный кокс. По данным Терреса [87], буроугольный кокс обладает активностью большей, чем другие виды кокса.

Пористость каменноугольного кокса способствует большей его активности сравнительно с антрацитом.

В главе I указывалось, что для того, чтобы в генераторе разложение CO_2 и H_2O раскаленным углеродом на горючие CO и H_2 произошло достаточно быстро, температура раскаленной зоны должна быть возможно высока — значительно выше, чем это требуется по условиям равновесия взаимодействующих CO_2 и C и H_2O и C.

Чем ниже температура перегонки, тем ниже температура воспламенения получаемого кокса. Это объясняется тем, что полученный при высокой температуре кокс обладает большей теплопроводностью и поэтому загорается лишь при подогреве его частиц до высокой температуры и подводе большого количества тепла, так как вследствие теплопроводности и излучения он быстро охлаждается. Кроме того при высокой температуре происходят превращения углерода, уменьшающие его реакционную способность.

Коксовый остаток молодых топлив (дров, торфа, бурого угля), не обладающий большой теплопроводностью, может быть легче разожжен или же поддерживаться в раскаленном виде при очень неинтенсивном горении, так как выделяющееся небольшое количество тепла не отводится топливом и температура очага горения высока.

Различные топлива дают различный по форме коксовый остаток.

Дрова, торф и брикеты бурого угля сохраняют свою форму при нагревании, уменьшаясь лишь в размере соответственно улетучиванию части топлива. Благодаря этому между отдельными кусками топлива в генераторе имеются большие промежутки для прохода воздуха и газов.

Бурый уголь часто дает порошкообразный или мелкозернистый коксовый остаток. Впрочем и кусковатый коксовый остаток бурого угля обладает слабой прочностью и крошится в генераторе, в результате чего уплотняется слой топлива в генераторе, увеличивается сопротивление слоя, ухудшаются условия равномерного прохождения газов и увеличивается унос пыли из генератора. Поэтому шуровку топлива ломами стараются производить возможно реже, чтобы не способствовать распадению бурого угля.

Свойством распадаться при нагревании обладают также и некоторые каменные угли.

Многие каменные угли обладают свойством спекаться. Это свойство весьма различно для различных сортов каменного угля.

При сильном спекании топлива в верхних слоях генератора отдельные места закупориваются, и через них не проходят газы, а иногда образуются сплошные своды. Даже сравнительно мало спекающийся уголь, как например лисичанский, при газификации в генераторах со швельшахтой размягчается и переходит в тестообразное состояние.

Некоторые из применяемых или применявшихся спекающихся каменных углей, например бежановские, причиняют неудобства вследствие спекания даже в обычных конструкциях генераторов, и поэтому приходится работать при низком слое и с худшими показателями во избежание слишком интенсивной шуровки. Сильное спекание, необходимость интенсивной шуровки и невозможность работы с высоким слоем топлива наблюдаются также при работе на спекающихся сортах ленинских углей (майеровском, болдыревском, серебряниковском).

Из донецких каменноугольных топлив пригодными для газификации следует считать угли марок Д и Г (из последних желательны не сильно спекающиеся). Соответственными должны быть и каменные угли других месторождений.

Возможна следующая характеристика коксового остатка угля, применяемого в генераторах: кокс может быть порошкообразным, слипшимся, слабо спекшимся, спекшимся, но не спекшимся — плотным.

Генераторы с автоматическими шуровочными приспособлениями рекомендуется снабжать углем, дающим слабо спекающийся или спекающийся кокс во избежание сильного пыления генераторов.

Спекание угля обусловливает тяжелую шуровку, и для улучшения условий газификации спекающиеся угли часто смешивают с неспекающимися.

Пригодность каменных углей для газификации может быть определена методом проф. Л. М. Сапожникова (см. выше). При толщине пластического слоя в 15—20 *мм* уголь сильно спекается; наиболее пригодный для газогенераторов уголь должен иметь толщину пластического слоя около 7 *мм* при газовых углях и около 4 *мм* — при тощих. Если слой толще, то уголь сильно спекается. Недостаточная толщина влечет за собой порошковатость кокса.

Процесс сухой перегонки обогащает газ продуктами с высокой теплотворной способностью, дающими сильно лучеиспускающее пламя. Этим объясняется то обстоятельство, что часто предпочитают применять при газификации для отопления печей, работающих с высокими температурами, топлива с высоким содержанием летучих.

При газификации топлив, содержащих серу, получаемый газ содержит сероводород.

H_2S и SO_2 являются вредными для ряда производств: металлургического, стекольного, керамического и др., а также для здоровья людей. Топливом, не содержащим серу, являются дрова. В торфе бывает обычно небольшое содержание серы: в сфагновых — до 0,5%,

в осоковых торфах — до2%. В бурых и каменных углях содержание серы меняется в зависимости не только от примеси сульфатов и сульфидов, но и от количества органических сернистых соединений, входящих в состав углей. Из бурых углей наибольшее содержание серы имеет подмосковный уголь — в среднем 4% (1—15%). Эти колебания обусловлены главным образом различным содержанием пиритов. Челябинский уголь содержит серы до 1% и богословский — 0,5%.

Угли и антрациты содержат серу в различных количествах. Содержание ее особенно значительно в некоторых донецких углях (в длиннопламенных — 3—4%).

При сухой перегонке сера отчасти остается в полукоксе, а отчасти удаляется вместе с летучими и распределяется между смолой и газом. Чем моложе уголь, тем больше он образует летучих веществ при перегонке и тем относительно меньше серы остается в полукоксе. Содержание серы в полукоксе, выраженное в процентах от сухого вещества, обычно бывает очень близким к содержанию серы в исходном угле.

Каменные угли при перегонке выделяют большое количество летучей серы в виде жидких органических соединений и меньшее — в виде сероводорода, а бурые угли — наоборот.

Содержание сероводорода в генераторном газе зависит от характера дутья. С увеличением содержания пара в дутье увеличивается количество серы, переходящей в газ. Это находится в соответствии с процессами образования сероводорода, описанными выше.

При непрерывном получении воздушного или смешанного генераторного газа часть серы переходит в газ, а часть остается в золе. При периодическом получении водяного газа с продуктами горячего дутья уходит лишь малая часть серы, так как длительность периода газования и наличие в водяном газе большого количества водорода и водяного пара способствуют переходу серы в водяной газ. Увеличение основности шлаков способствует связыванию серы, что используется при газификации с жидким шлакоудалением.

Распределение серы угля при газификации на смешанный газ было исследовано [173] для каменных углей и характеризуется табл. 78.

Таблица 78

Распределение серы при газификации каменного угля (в %)

Статьи	I	II	III
Переходит в золу	6,0	14,1	20,2
» » смолу	1,0	1,0	1,1
» » H_2S	71,2	65,1	63,3
» » SO_2	14,9	14,7	9,7
» » органические соединения	6,9	5,1	5,7
Температура газа при выходе (в °С)	603	590	628

При исследовании распределения серы в продуктах газификации в генераторе водяного газа были получены следующие результаты:

в водяном газе в виде H_2S — 45%, в золе — 7,9%, в шлаке — 5,4%, в пыли — 1,6%, в газах горячего дутья — 14% и неучтенной — 26,1%

Наиболее благоприятны условия перехода серы в генераторный газ при получении двойного водяного газа. В этом случае продукты горячего дутья омывают лишь полукокс, содержащий более стойкие соединения серы. Главная масса серы выделяется из топлива при омывании его водяным газом с высоким содержанием водорода и водяного пара.

Терресом и др. [87] исследовалось воздействие при 600° водяного пара в смеси с азотом на буроугольный кокс, полученный при 600°. С увеличением содержания пара в смеси количество серы, переходящее в газ в виде H_2S и SO_2, возрастало, причем особенно сильно — при увеличении содержания H_2O в смеси выше 10%.

По тем же опытам с уменьшением продолжительности соприкосновения водяного пара, особенно при низкотемпературных коксах, падала интенсивность перехода серы в газ. При температурах до 600° количество газифицируемой серы составляло до 0,12 *мг* на 1 *мг* С.

Так как содержание серы в коксе с возрастанием температуры получения кокса уменьшается, то с увеличением температуры коксования топлива, применяемого для получения водяного газа, уменьшается содержание серы в водяном газе.

В генераторе при окислении сернистого железа кислородом возможно образование некоторого количества сернистого газа. В дальнейшем сернистый газ, взаимодействуя с водородом, частично или полностью переходит в сероводород.

В случае значительного содержания в генераторном газе сероводорода при соответствующих требованиях потребителя газ подвергают очистке.

В генераторном газе содержится некоторое количество аммиака, выделяющегося из топлива при его нагревании и улавливавшегося в прошлом в генераторных установках Монда, в которых в генератор подводилось большое количество перегретого водяного пара.

Было сделано много предложений усовершенствования процесса Монда, преследующих уменьшение расхода пара. Так было предложено охлаждать верхнюю часть слоя топлива путем устройства охлаждающего кожуха, примешивать к дутью богатый водородом газ, который одновременно подводит и необходимые для процесса тепло и пар, примешивать вещества, например хлориды щелочных и щелочноземельных металлов, препятствующие разложению аммиака.

Эти предложения однако не могли приостановить вытеснения способа получения аммиака по Монду другими, более рентабельными способами.

☆

Глава шестая

ОЧИСТКА И ОСУШКА ГАЗА

1. ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ

Под очисткой газа понимают освобождение его от летучей пыли, сажи, смолы и масел, аммиака, сернистых соединений и пр.

В зависимости от условий газификации и применения к газу могут предъявляться специальные требования в отношении очистки.

В случае небольших примитивных установок газ может направляться непосредственно из генератора к потребителю, и следовательно к последнему газ попадает в том же (или почти в том же) виде, в каком он покидает генератор. Однако в современных установках газ обычно до поступления к местам потребления подвергается предварительной очистке, связанной с необходимостью удаления из газа загрязняющих взвешенных частиц или компонентов газовой смеси, улавливания смолистых веществ и осушки газа.

Унос с газом пыли и сажи может достигать при некоторых сортах топлива 7—10% от веса газифицируемого топлива.

Увеличению содержания пыли в газе благоприятствует наличие большого количества мелочи в топливе, интенсивная работа газогенератора, применение автоматических шуровочных и питательных приспособлений и газификация механически непрочных и распадающихся при нагревании сортов топлива. Вместе с пылью газом уносится из генератора сажа, которая является главным образом результатом пирогенетического разложения смол, и количество ее возрастает с повышением температуры газа. Пыль и сажа, осаждаясь в газопроводах, быстро уменьшают их живое сечение, вследствие чего необходимо время от времени производить чистку газопроводов, что связано с перебоями в питании газом.

Если газ предназначается для питания незначительного количества печей, расположенных рядом с газогенераторной станцией, то в этом случае можно удовлетвориться сухой очисткой газа от пыли и сажи и питать печи горячим газом. В случае большого разветвления газопроводов и большого протяжения их, а также в случае специальных требований, предъявляемых потребителями газа, необходима более тщательная предварительная очистка газа от пыли и сажи, и в этом случае применяется так называемая мокрая очистка.

Осушка газа, т. е. выделение и удаление содержащегося в нем водяного пара, имеет обычно целью уменьшение количества балласта

в газе. Помимо этого благодаря осушке избегается выделение большого количества влаги при дальнейшем движении газа в газопроводах и уменьшается объем транспортируемого газа. Последнему обстоятельству способствует также охлаждение газа. Влага появляется в газе в результате выделения влаги топлива и влаги сухого разложения, прохождения через слой топлива неразложенным некоторого количества водяного пара, примешиваемого к дутью, и пропуска пара паровыми затворами. При влажных топливах количество водяного пара в газе может быть очень велико (при воздушносухих дровах и торфе и при буром угле — до 300 $г/м^3$). Водяной пар, содержащийся в газе, снижает температуру горения, так как выделяющееся при сгорании горючих частей газа тепло частично расходуется на нагревание пара; кроме того, входя в состав отходящих газов, водяные пары уносят из печей вследствие своего нагрева значительное количество тепла, соответствующее температуре отходящих газов.

Газ из древесины, торфа, бурого и каменного углей содержит смолистые вещества в виде паров или во взвешенном состоянии (в виде тумана). Если в целях осушки или очистки подвергать охлаждению газ, содержащий и влагу и смолу, то выделение водяного пара и смолы пойдет одновременно и они смешаются с охлаждающей водой. Отделение смолы от воды является затруднительным. Кроме того значительная часть смол будет все же унесена газом и осядет в дальнейшем по пути следования в газовых нагнетательных вентиляторах и газопроводах, что вызовет необходимость их чистки и бесполезную потерю части смолы. Поэтому в большинстве случаев необходимо до охлаждения подвергнуть газ предварительной очистке от смол посредством специальных аппаратов.

Предварительная очистка газа от смолы и улавливание смолы могут диктоваться также соображениями чисто экономического и хозяйственного порядка, так как смола сама по себе является ценным продуктом. Наконец очистка газа от смолы может быть вызвана специальными требованиями, предъявляемыми потребителями газа.

Очищенный от пыли, сажи, смолы и влаги газ возможно транспортировать по газопроводам малого диаметра под большим давлением, с хорошей и удобной регулировкой, с установкой счетчиков газа и пользоваться при его сжигании более экономичными конструкциями горелок. Кроме того он пригоден для питания газовых машин.

К очистке газа относится также удаление из него отдельных составных частей, в частности аммиака и сероводорода. Улавливание аммиака при топливах, имеющих значительное содержание азота (до 1—1,5% и больше), раньше имело целью получение сульфата аммония (способ Монда). В последнее время этот способ получения аммиака вытесняется более совершенными способами. Что касается сернистых соединений, то улавливание их вызывается преимущественно требованиями производственного и санитарного характера, хотя известное значение имеет и возможность получения серы в виде денного побочного продукта.

В целях обогащения газа и для удовлетворения специальных производственных нужд в ряде случаев подвергают генераторный газ очистке от других составных частей — углекислоты, метана, азота,

окиси углерода. Так при синтезе аммиака газ освобождается от углекислоты и окиси углерода, а иногда и от метана; для целей дальнего газоснабжения газ может быть очищен от углекислоты и сероводорода и т. д., причем отдельные выделяемые при очистке газы могут быть утилизированы.

Выбор схемы очистки газа зависит от рода газифицируемого топлива, типа газогенератора и экономических и производственных соображений.

2. СУХАЯ ОЧИСТКА ГАЗА

Применение

Сухая очистка газа применяется преимущественно для каменных углей, антрацита и кокса (в случае газификации их в обыкновенных газогенераторах) по следующим причинам:

а) влажность газа из этих видов топлива обычно очень незначительна —40—80 *г* влаги в 1 *м*³ газа, и следовательно охлаждения газа в целях осушки не требуется;

б) температура газа при выходе из генератора при работе на антраците и коксе составляет 350—650° С, а при работе на газовом спекающемся угле может достигать 700—800° С.

Так как теплосодержание газа в этом случае велико (каждые 50° температуры газа соответствуют примерно 1% теплотворной способности топлива), то очевидно, что по мере возможности должны быть приняты все меры к доведению физического тепла газа до самой печи, почему и является более целесообразным при работе на этих видах топлива применение сухой очистки газа;

в) для углей, содержащих смолу, может иметь значение сохранение в газе смол; это важно как в отношении увеличения теплотворной способности газа вследствие присутствия в нем смолистых веществ, так и с точки зрения характера пламени, обладающего в этом случае более высокой лучеиспускающей способностью; для сохранения смолистых веществ в газе также необходимо принять все меры для доведения газа к печам в горячем состоянии.

Схема установки

В случае сухой очистки газ из генератора проходит прежде всего пылеуловитель, затем поступает в коллектор газа и отсюда распределяется к местам потребления.

Подобные установки представлены на рис. 168 и 169, где газ из генераторов попадает в пылеуловитель и оттуда — в коллектор газа, распределяясь из последнего по отдельным потребителям. В этом случае газ подается в сеть за счет давления, создаваемого дутьевым устройством, обслуживающим генератор, и вверху генератора поддерживается значительное положительное давление, что затрудняет обслуживание генератора.

Ряд существующих небольших генераторных установок на дровах и торфе — топливах, дающий влажный газ, — не снабжен осушительными и смолоулавливающими приспособлениями в целях упрощения и удешевления установок. Роль уловителей взвешенных частиц, количество которых при древесине ничтожно и при торфе незначительно, играют в этом случае коллектор и газопроводы, которым придают большие размеры (рис. 52).

Пылеуловители

Приспособления для выделения пыли из газа комбинируются с газопроводами. Для выделения пыли используют пылеуловители и изменения сечений и направлений газопроводов.

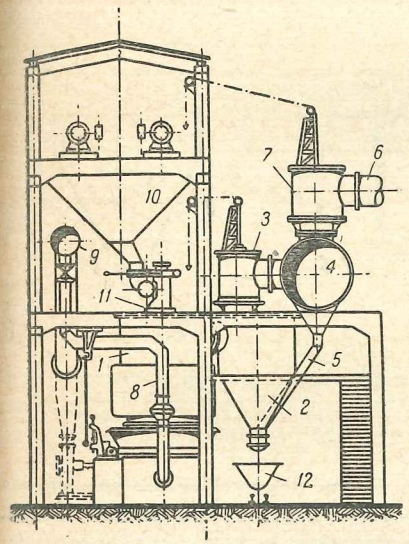


Рис. 168. Газогенераторная установка с сухой очисткой:

1—генератор, *2*—пылеуловитель, *3*—тарельчатый затвор, *4*—коллектор, *5*—рукав для пыли, *6*—газопровод к потребителю, *7*—тарельчатый затвор, *8*—воздухопровод к генератору, *9*—общая воздушная магистраль, *10*—бункер, *11* загрузочное приспособление, *12*—вагонетка для пыли и золы

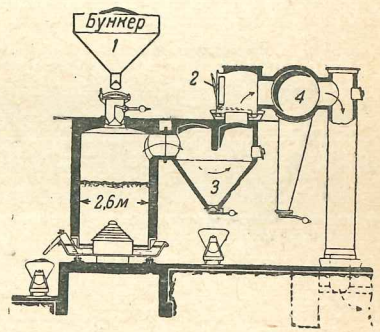


Рис. 169. Газогенераторная установка с сухой очисткой:

1—бункер, *2*—клапан с гидравлическим затвором, *3*—пылеуловитель, *4*—коллектор.

Выпадение взвешенных в газе частиц происходит в большей или меньшей мере по всему пути газопроводов. Для удобства эксплоатации улавливают пыль из газа по возможности полно по выходе из генератора или в специально намеченных местах.

Сухие пылеуловители (рис. 170) могут представлять собой большую камеру, в которой газ движется с малой скоростью, или камеру, в которой газ претерпевает изменения направления движения благодаря устройству перегородки или соответствующему расположению отверстий для входа и выхода газа. Иногда применяют пылеуловители циклонного типа.

Пылеуловители в случае горячего газа снабжают футеровкой в $^1/_2$ или $^1/_4$ огнеупорного кирпича. Они перекрываются металлическими крышками на болтах с асбестовым уплотнением.

Пылеуловители суживают внизу и снабжают клапанами для спуска снизу пыли на ходу и предохранительными клапанами и лазами для доступа внутрь.

Хорошо сконструированный пылеуловитель выделяет 60—80% и более взвешенной в газе пыли (грубая очистка).

В случае необходимости в более тонкой сухой очистке возможно применение других приспособлений, например электрофильтров, дезинтеграторов и фильтрующих мешков [176]. Устройство электрофильтров описано ниже. Что касается фильтрующих мешков, то их устройство основано на пропускании газа через хлопчатобумажную или шерстяную ткань. Очистка газа с помощью этих устройств может быть доведена до 0,01—0,02 *г/м*³.

Обычно эти очистные устройства в генераторных установках для сухой очистки газа от пыли не применяются ввиду требуемой низкой

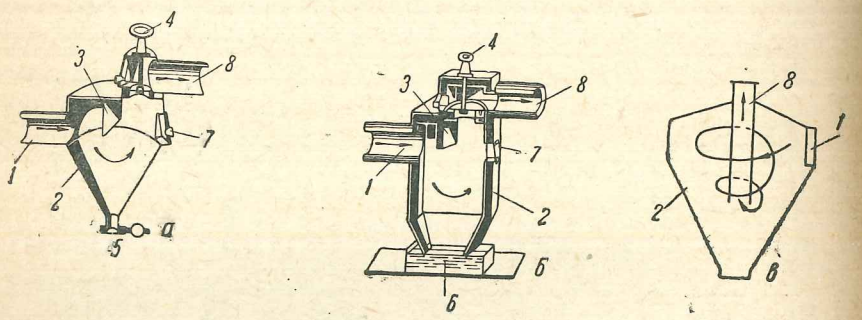


Рис 170. Пылеуловители:

а—с перегородкой, *б*—с перегородкой и гидравлическим затвором, *в*—циклонный пылеуловитель: *1*—вход газа, *2*—корпус пылеуловителя, *3*—перегородка, *4*—тарельчатый клапан, *5*—клапан для выбрасывания пыли, *6*—гидравлический затвор, *7*—предохранительный клапан, *8*—отвод газа

температуры поступающего в них газа: не более 100° — для фильтров из ткани и не более 200 ° — для электрофильтров, или же необходимости орошения газа промывной жидкостью в дезинтеграторах.

Выделение пыли из газа

Взвешенные в газах частицы можно разбить на три группы:

1. Пыль — частицы диаметром больше 10^{-3} *см*, падающие в спокойном воздухе с возрастающей скоростью.
2. Туманы — частицы диаметром от 10^{-3} до 10^{-5} *см*, опускающиеся в спокойном воздухе с постоянной скоростью и не диффундирующие.
3. Дымы — частицы диаметром от 10^{-5} до 10^{-7} *см*, движущиеся под влиянием ударов газовых молекул, легко диффундирующие и в спокойном воздухе практически не осаждающиеся.

Различают также: грубую пыль с частицами размером выше 200 μ, средней тонкости — от 200 до 20 μ и тонкую пыль с частицами размером от 20 μ и ниже.

Очистка под действием силы тяжести

В безвоздушном пространстве тела падают со скоростью $v = gt$. В газовой среде скорость увеличивается, пока сила сопротивления не уравновесит силы тяжести, после чего тело падает с постоянной скоростью.

Сила сопротивления среды оседающим пылинкам выражается следующим равенством:

$$F = \zeta \frac{v_{oc}^2}{2g} \gamma_г S,$$

где F — сопротивление среды в *кг*,
v_{oc} — скорость пылинки в *м/сек*,
$\gamma_г$ — объемный вес газа в *кг/м*³,
S — площадь проекции пылинки в *м*².

Когда сила сопротивления среды уравновесит силу тяжести P, пылинка будет падать с постоянной скоростью, определяемой из равенства:

$$P = mg = \zeta \frac{v_{oc}^2}{2g} \gamma_г S,$$

где m — масса частицы;
откуда

$$v_{oc} = \sqrt{\frac{2Pg}{\zeta \gamma_г S}}.$$

Но

$$P = \frac{4}{3} \pi r^3 \gamma_n$$

и

$$S = \pi r^2,$$

где γ_n — объемный вес вещества пыли в *кг/м*³,
r — радиус пылинки в *м*.

Следовательно

$$v_{oc} = \sqrt{\frac{8g\gamma_n}{3\zeta\gamma_г} r}.$$

Величина ζ коэфициента сопротивления зависит от числа Рейнольдса. При весьма малых числах Рейнольдса (Re≤1) сопротивление среды шарообразному телу изменяется согласно закону Стокса и:

$$\zeta = \frac{24}{\mathrm{Re}} = \frac{24\, g\eta}{2r\, v_{oc}\, \gamma_г},$$

где η — коэфициент вязкости газа в *кг сек/м*²

При подстановке значения ζ в выражение для F получаем:

$$F = 6\pi r\, v_{oc}\, \eta,$$

т. е. что сила сопротивления пропорциональна первой степени скорости падения.

Закон Стокса применим для частиц размером от 0,1 до 100 μ. При очень малых размерах частицы начинают двигаться также под влиянием ударов газовых молекул.

Для сравнительно мелкой пыли, выделяющейся из генераторного газа под влиянием силы тяжести в газопроводах и пылеуловителях

30* 302/1

скорость осаждения пыли и минимальный размер оседающих частиц можно определить по формуле Стокса.

Если принять, что частицы пыли представляют собой шары, что скорость газа по сечению газопровода равномерна и что результатом действия конвекционных токов можно пренебречь и уноса осевшей пыли не происходит, то возможно написать:

$$\frac{4}{3}\pi r^3\gamma_n = 6\pi r\, v_{oc}\,\eta$$

и

$$v_{oc} = \frac{2\gamma_n r^2}{9\eta}.$$

Из приведенного выражения следует, что осаждение пыли ухудшается с уменьшением величины частиц и увеличением вязкости газовой среды.

Если камера, по которой движется газ, имеет длину l *м* и ширину b *м*, то производительность W *м*³/*сек* будет равна:

$$W = blv_{oc} = S_к\, v_{oc},$$

т. е. при заданных постоянных v_{oc} и $bl = S_к$ (площадь в плане) производительность не изменится в зависимости от глубины и скорости потока и соотношения длины и ширины камеры.

Если высота камеры — H*м*, скорость газа — v_{oc} *м*/*сек* и время пребывания газа в камере — t *сек.*, то из вышеприведенного равенства, учитывая, что

$$v_{oc} = \frac{H}{t},\quad t = \frac{l}{v_г}\quad \text{и}\quad v_{oc} = \frac{Hv_г}{l},$$

получаем:

$$\frac{4}{3}r^2\gamma_n = \frac{6\eta H v_г}{l},$$

т. е. размер частицы, осаждающейся в пылеуловителе, тем меньше, чем больше горизонтальная проекция пылеуловителя и плотность материала частицы.

Пример. Требуется определить минимальный размер осаждающихся сажи и пыли в камере длиной в 3 *м*, высотой в 2 *м* и шириной в 3 *м*, через которую проходит 3000 *м*³/*час* газа с температурой 500°, имеющего вязкость в $5\cdot10^{-6}$ *кг сек*/*м*². Объемный вес пыли — 1600 *кг*/*м*³.

Скорость движения газа:

$$\frac{3000\cdot(500+273)}{3600\cdot3\cdot2\cdot273} = 0{,}4\ \text{м/сек}.$$

Продолжительность пребывания газов в камере:

$$3:0{,}4 = 7{,}5\ \text{сек}.$$

Скорость падения частиц должна быть не меньше:

$$2:7{,}5 = 0{,}267\ \text{м/сек}.$$

Минимальный выпадающий размер частиц определяем из выражения:

$$r = \sqrt{\frac{9\cdot5\cdot10^{-6}\cdot0{,}267}{2\cdot1600}} = 61\cdot10^{-6}\ м = 61\ \mu.$$

Пыль состоит обычно из частиц различной величины. Для определения степени осаждения из газа частиц различной величины учитывают зависимость весового состава пыли от диаметра частиц [178].

В области Re=1 до Re= 1000 наблюдается постепенный переход от линейной зависимости сопротивления среды от скорости частицы к квадратичной зависимости. В этой области величина ζ может быть выражена приближенной формулой:

$$\zeta = \frac{24}{\mathrm{Re}} + \frac{4}{\sqrt[3]{\mathrm{Re}}}.$$

В области Re=1000 до Re=250 000 имеет место квадратичная зависимость сопротивления от скорости.

Снабженные перегородками пылеуловители представлены на рис. 170. В них газ несколько раз меняет направление движения и кроме того резко уменьшается его скорость.

Под влиянием силы тяжести и удара, имеющего место при резком уменьшении скорости, пыль выпадает из газового потока. Под перегородкой должно быть достаточное сечение для прохода газа во избежание завихрения уже выделившихся частичек пыли.

Для проверки надежности пылеуловителя нужно определить, с какой скоростью газ переходит из горизонтальных прослоек в вертикальные, в которых пыль движется под влиянием сил тяжести и трения и живой силы потока.

В случае отсутствия в пылеуловителе перегородки ввод и вывод газа должны находиться в различных плоскостях.

Циклонные пылеуловители

Применение циклонных пылеуловителей основано на действии центробежной силы. Это — цилиндрические, переходящие в нижней части на конус, приспособления (рис. 170), в которые газ входит тангенциально. Газ, вращаясь, проходит в пылеуловителе, причем взвешенные частицы под действием центробежной силы прижимаются к его стенкам и под влиянием трения и силы тяжести падают вниз. Очищенный газ выходит через центральную трубу в середине циклона.

В циклонном пылеуловителе газовый поток вращается вокруг вертикальной оси. При этом наблюдаются два вида вращения: 1) вращение с постоянной угловой скоростью Ω (подобно твердым телам) и следовательно с возрастающей пропорционально расстоянию от оси вращения R окружной скоростью v и 2) потенциальное вращение, когда окружные скорости частиц обратно пропорциональны расстоянию от оси вращения.

При малой высоте цилиндрической части циклона движение газа сопровождается образованием вихрей вследствие столкновения струй

скорость осаждения пыли и минимальный размер оседающих частиц можно определить по формуле Стокса.

Если принять, что частицы пыли представляют собой шары, что скорость газа по сечению газопровода равномерна и что результатом действия конвекционных токов можно пренебречь и уноса осевшей пыли не происходит, то возможно написать:

$$\frac{4}{3}\pi r^3\gamma_n = 6\pi r\, v_{oc}\,\eta$$

и

$$v_{oc} = \frac{2\gamma_n r^2}{9\eta}.$$

Из приведенного выражения следует, что осаждение пыли ухудшается с уменьшением величины частиц и увеличением вязкости газовой среды.

Если камера, по которой движется газ, имеет длину l *м* и ширину b *м*, то производительность W *м*³/*сек* будет равна:

$$W = blv_{oc} = S_к\, v_{oc},$$

т. е. при заданных постоянных v_{oc} и $bl = S_к$ (площадь в плане) производительность не изменится в зависимости от глубины и скорости потока и соотношения длины и ширины камеры.

Если высота камеры — *Нм*, скорость газа — v_{oc} *м/сек* и время пребывания газа в камере — t *сек.*, то из вышеприведенного равенства, учитывая, что

$$v_{oc} = \frac{H}{t},\quad t = \frac{l}{v_г}\quad \text{и}\quad v_{oc} = \frac{Hv_г}{l},$$

получаем:

$$\frac{4}{3}r^2\gamma_n = \frac{6\eta H v_г}{l},$$

т. е. размер частицы, осаждающейся в пылеуловителе, тем меньше, чем больше горизонтальная проекция пылеуловителя и плотность материала частицы.

Пример. Требуется определить минимальный размер осаждающихся сажи и пыли в камере длиной в 3 *м*, высотой в 2 *м* и шириной в 3 *м*, через которую проходит 3000 *м*³/*час* газа с температурой 500°, имеющего вязкость в $5\cdot 10^{-6}$ *кг сек*/*м*². Объемный вес пыли — 1600 *кг*/*м*³.

Скорость движения газа:

$$\frac{3000\cdot(500+273)}{3600\cdot 3\cdot 2\cdot 273} = 0{,}4\ \text{м/сек}.$$

Продолжительность пребывания газов в камере:

$$3 : 0{,}4 = 7{,}5\ \text{сек}.$$

Скорость падения частиц должна быть не меньше:

$$2 : 7{,}5 = 0{,}267\ \text{м/сек}.$$

Минимальный выпадающий размер частиц определяем из выражения:

$$r = \sqrt{\frac{9\cdot 5\cdot 10^{-6}\cdot 0{,}267}{2\cdot 1600}} = 61\cdot 10^{-6}\ м - 61\ \mu.$$

Пыль состоит обычно из частиц различной величины. Для определения степени осаждения из газа частиц различной величины учитывают зависимость весового состава пыли от диаметра частиц [178].

В области Re=1 до Re= 1000 наблюдается постепенный переход от линейной зависимости сопротивления среды от скорости частицы к квадратичной зависимости. В этой области величина ζ может быть выражена приближенной формулой:

$$\zeta = \frac{24}{\mathrm{Re}} + \frac{4}{\sqrt[3]{\mathrm{Re}}}.$$

В области Re=1000 до Re=250 000 имеет место квадратичная зависимость сопротивления от скорости.

Снабженные перегородками пылеуловители представлены на рис. 170. В них газ несколько раз меняет направление движения и кроме того резко уменьшается его скорость.

Под влиянием силы тяжести и удара, имеющего место при резком уменьшении скорости, пыль выпадает из газового потока. Под перегородкой должно быть достаточное сечение для прохода газа во избежание завихрения уже выделившихся частичек пыли.

Для проверки надежности пылеуловителя нужно определить, с какой скоростью газ переходит из горизонтальных прослоек в вертикальные, в которых пыль движется под влиянием сил тяжести и трения и живой силы потока.

В случае отсутствия в пылеуловителе перегородки ввод и вывод газа должны находиться в различных плоскостях.

Циклонные пылеуловители

Применение циклонных пылеуловителей основано на действии центробежной силы. Это — цилиндрические, переходящие в нижней части на конус, приспособления (рис. 170), в которые газ входит тангенциально. Газ, вращаясь, проходит в пылеуловителе, причем взвешенные частицы под действием центробежной силы прижимаются к его стенкам и под влиянием трения и силы тяжести падают вниз. Очищенный газ выходит через центральную трубу в середине циклона.

В циклонном пылеуловителе газовый поток вращается вокруг вертикальной оси. При этом наблюдаются два вида вращения: 1) вращение с постоянной угловой скоростью Ω (подобно твердым телам) и следовательно с возрастающей пропорционально расстоянию от оси вращения R окружной скоростью v и 2) потенциальное вращение, когда окружные скорости частиц обратно пропорциональны расстоянию от оси вращения.

При малой высоте цилиндрической части циклона движение газа сопровождается образованием вихрей вследствие столкновения струй

газа; кроме того время воздействия центробежной силы на взвешенные в газе частицы мало и эффект действия незначителен.

Предложены были циклоны со спиральными направляющими поверхностями в циклоне, а также с газоходами, расположенными по винтовой линии вокруг выхлопной трубы. Подобные циклоны, особенно последние, более эффективны в смысле выделения пыли вследствие большей продолжительности очистки газа, но сопротивление их значительно больше, чем цилиндрических, вытянутой формы, циклонных пылеуловителей. Дополнительное усовершенствование простых по устройству цилиндрических циклонов вытянутой формы заключается в винтообразном подводе газового потока в верхней части цилиндра, с целью устранения удара струй, наблюдаемого при простом подводе.

Для уменьшения сопротивлений при переходе газового потока из конической части в центральную трубу и уменьшения уноса пыли, связанного с образованием вихрей, центральную трубу циклона снабжают иногда выпрямляющими лопастями.

Предложены также прямоточные циклонные пылеуловители (ВИТГЭО) горизонтальной формы, не имеющие центральной трубы. Внутрь такого циклона вставлен архимедов винт. Газ вращается в винтовом газоходе, образованном трубой и винтом. Под действием центробежной силы взвешенные частицы отбрасываются к стенкам трубы и через отверстия попадают в пылесборную камеру, в первых секциях которой оседает более крупная пыль, а в последующих — более мелкая, выделенная в результате более длительного воздействия. Благодаря отсутствию центральной трубы уменьшается диаметр циклона и следовательно увеличиваются центробежная сила и пылеотделение. Секционный отвод пыли предупреждает возможность последующего захвата выделенной пыли.

Взвешенная частица, движущаяся в циклонном пылеуловителе к кожуху под действием центробежной силы, имеет скорость v_{oc}, при которой силы сопротивления среды и центробежная уравновешивают друг друга, т. е.

$$\zeta \frac{v_{oc}^2}{2g} \gamma_г S = \frac{mv^2}{R},$$

где v — скорость вращательного движения газового потока и частицы в *м/сек*;

R — расстояние частицы от оси циклона в *м*.

Подставляя вместо S и m их значения, получаем:

$$v_{oc} = \sqrt{\frac{8r\,v^2\gamma_n}{3\zeta R \gamma_г}}.$$

Как уже указывалось, значение коэфициента сопротивления зависит от числа Рейнольдса и при $Re \leqslant 1$ величина $\zeta = \frac{24}{R}$, что дает при подстановке

$$6\pi r \eta v_{oc} = \frac{mv^2}{R}$$

и выражает закон Стокса, что сопротивление среды для частиц размером от 0,1 до 100 μ пропорционально первой степени скорости. Отсюда при допущении, что скорость газа во всем сечении вращающегося потока постоянна и равна скорости входа, получается, что частица движется перпендикулярно к потоку со скоростью осаждения (179,180)

$$v_{oc} = \frac{2r^2\gamma_n v^2}{9\eta g R},$$

где v_{oc} — скорость осаждения частицы в *м/сек*,

r — радиус частицы в *м*,

γ_n — объемный вес вещества пыли в *кг/м*^{3},

v — входная скорость газа в *м/сек*,

η — вязкость газа в *кг сек/м*^{2},

g — ускорение силы тяжести в *м/сек*^{2},

R — расстояние частицы от оси циклона в *м*.

При соответствующей обработке выражения и обозначении через D — диаметра циклона в *м*, через s — расстояния частицы от стенки циклона в *м* и через n — числа оборотов пыли в циклоне, получается, что наименьший размер осаждаемых частей $2\,r_{min}$ равен:

$$2\,r_{min} = 3\sqrt{\frac{\eta g}{\pi \gamma_n v}} \cdot \sqrt{s\left(1 - \frac{s}{D}\right)\frac{1}{n}}.$$

Из приведенных формул следует, что качество очистки улучшается с увеличением скорости газа, уменьшением диаметра циклона, увеличением плотности вещества пыли, уменьшением вязкости газа и увеличением размеров частиц пыли, а также с увеличением времени воздействия центробежной силы (увеличение n).

Пример. Если скорость газа при входе в пылеуловитель равна 10 *м/сек*, вязкость газа $\eta = 5 \cdot 10^{-6}$ *кг сек/м*^{2}, диаметр циклона $D = 2{,}5$ *м*, диаметр отводного отверстия $D_1 = 0{,}6$ *м*, объемный вес пыли — 1600 *кг/м*^{3}, то размер минимальной выделяемой частицы можно определить, исходя из предположения, что газовый поток делает в циклоне 1 оборот ($n = 1$) и что в наихудших в смысле возможности осаждения условиях находится частица пыли у края потока, выходящего через газоотводную трубу ($s = 0{,}5\,D - 0{,}5\,D_1$):

$$2r_{min} = 3\sqrt{\frac{5 \cdot 10^{-6} \cdot 9{,}81}{3{,}14 \cdot 1600 \cdot 10} \cdot 0{,}95\left(1 - \frac{0{,}95}{2{,}5}\right)} = 72 \cdot 10^{-6}\ м, \text{ т. е. } 72\ \mu.$$

Указанное соотношение пригодно для отдельных частиц заданной величины. В действительности в осаждаемой пыли содержатся частицы различной крупности.

Определение степени осаждения в циклоне частиц различных размеров производится с помощью соответствующего графического построения характеристики пыли и кривой зависимости величины наименьших осаждаемых частиц (r_{min}) от расстояния до стенки циклона.

В циклоне осаждаются без остатка все частицы крупнее той наименьшей величины, которая может быть осаждена, попадая в циклон

даже у внутреннего края входного отверстия. Частицы меньшей величины осаждаются частично.

Приведенные формулы для циклонного пылеуловителя выведены в предположении, что окружные скорости воздушного потока по сечению рабочей части циклона являются постоянными.

Смухнин П. Н. и Коузов П. А. [177] предложили считать постоянной угловую скорость $\Omega = \frac{v}{x}$, где x — расстояние до оси, что повидимому до известной степени обосновано для удлиненных цилиндрических циклонов и циклонов с винтообразно расположенными газоходами ввиду приближения в них в значительной части циклона характера вращения потока к вращению твердого тела.

Указанными исследователями выведены следующие формулы для расчета циклонных пылеуловителей.

Радиальная скорость для частицы, находящейся на расстоянии R_M от оси циклона, равняется:

$$v_{oc} = \sqrt{\frac{8r\Omega^2 R\gamma_n}{3\zeta\gamma_z}}.$$

Если обозначить через D диаметр циклона, через D_1 — диаметр центральной трубы, то в самом невыгодном случае твердая частица должна пройти под действием центробежной силы путь: $\frac{D}{2} - \frac{D_1}{2}$.

Время, потребное для этого, определится из выражения:

$$t = \sqrt{\frac{3\zeta \cdot \gamma_z}{2r\gamma_n\ \Omega^2}}\left(\sqrt{\frac{D}{2}} - \sqrt{\frac{D_1}{2}}\right).$$

Для $\mathrm{Re} \leqslant 1$

$$\zeta = \frac{24}{\mathrm{Re}},$$

$$v_{oc} = \frac{2\gamma_n r^2 \Omega^2 R}{9\eta g},$$

и

$$t = \frac{9\eta g}{2\gamma_n r^2 \Omega^2} \ln \frac{D}{D_1},$$

но

$$t = \frac{2\pi R_0 n}{v_{cp}} = \frac{2\pi n}{\Omega},$$

где R_0 — средний радиус циклона, равный $\frac{D + D_1}{4}$,

v_{cp} — средняя окружная скорость газового потока,

отсюда

$$\frac{2\pi n}{\Omega} = \frac{9\eta g}{2\gamma_n \Omega^2 r^2} \ln \frac{D}{D_1},$$

и размер осаждаемых частиц:

$$2r_{min} = 3\sqrt{\frac{\eta g}{\pi\gamma_n n\,\Omega} \ln \frac{D}{D_1}}.$$

Минимальные размеры осаждаемых частиц, вычисленные по обоим методам, отличаются друг от друга.

Ход вычисления размеров пылеуловителя следующий. Диаметр центральной трубы определяется из условия принятия действительной скорости порядка 5—8 *м/сек*. Ширина кольцевого пространства пылеуловителя обычно равна ширине входного отверстия, сечение которого определяется из расчета скорости в 8—15 *м/сек* при круглом сечении или прямоугольном с соотношением длины сторон от 1,5 до 2. Скорость при входе берется в соответствии с требуемой очисткой и допустимым сопротивлением (чем больше скорость, тем лучше очистка и больше сопротивление). Уменьшение скорости в циклоне сравнительно с входной для одного оборота газов может быть принято в 1,1 раза и для нескольких (5—6 оборотов) — в 1,4 раза, что дает возможность оценить высоту газового потока.

В случае циклонов неудлиненной формы обычно принимают, что газовый поток в циклоне делает один оборот. Увеличение числа оборотов (без завихрений) до 3—4 значительно улучшает степень очистки.

По требуемому минимальному размеру выделяемых частиц определяют время, необходимое для их выделения, и по времени при известной скорости частиц — необходимую длину газохода или число оборотов, в соответствии с чем подсчитывают высоту пылеуловителя.

Сопротивление циклонного пылеуловителя складывается из сопротивления при входе (удар) и движении по цилиндрической части (удары струй, трение о стенки и газовые прослойки), сопротивления при проходе через коническую часть (резкое изменение направления и скорости) и сопротивления центральной трубы. Сопротивление цилиндрического циклонного пылеуловителя не велико, так как постепенное уменьшение скорости позволяет использовать часть скоростного напора, располагаемого газом при входе

$$\left(\frac{v_{вх}^2}{2g}\gamma_z\right).$$

Сопротивление циклонного пылеуловителя может быть подсчитано по формуле:

$$h = K\frac{v_{вх}^2}{2g} \cdot \gamma_z + h_1,$$

где K — коэфициент, характерный для каждого пылеуловителя,

h_1 — сопротивление центральной трубы.

Повидимому величина K с достаточной надежностью может быть принята равной 2—3, а величина h_1 в основном зависит от сопротивления на выходе и может быть принята равной однократному скоростному напору для условий, имеющих место в трубе

$$\left(\frac{v_{тр}^2}{2g}\gamma_z\right).$$

Для расчета сопротивлений циклонного пылеуловителя часто приводится формула

$$h = \frac{v_{вх}^2}{g} \gamma_г \left(\frac{1}{D_1} - \frac{1}{D} \right),$$

применимая лишь для отдельных конструкций с вертикальными направляющими ребрами.

Исследования показывают, что степень очистки газа возрастает со скоростью лишь до известного момента (примерно до 25 *м/сек*), ограничиваемого пределами, когда увеличивающаяся турбулентность потока вызывает размывание пыли в конической части пылеуловителя и унос ее в центральную трубу. Дальнейшее увеличение эффекта очистки возможно путем замены одного циклона несколькими малого диаметра (мультициклоны).

Влияние вязкости с изменением температуры газа маскируется бо́льшим влиянием изменения скорости газа.

С увеличением тонкости пыли очистка газа ухудшается. Повышая входную скорость, теоретически можно выравнять влияние растущей тонкости пыли, практически же вследствие опасности уноса уже осажденной пыли быстро наступает предел допустимого увеличения скорости.

Чем уже входное отверстие циклона при том же диаметре циклона, тем короче путь осаждения и тем выше степень очистки. Если при диаметре циклона в 3 *м* и скорости в 25 *м/сек* теоретическая степень осаждения составляет 88% для ширины отверстия в 0,1 *м*, то для ширины отверстия в 1 *м* степень очистки падает до 69,5%. Уменьшению ширины отверстия на практике препятствует необходимость увеличения скорости входа для сохранения пропускной способности циклона.

С увеличением диаметра циклона при той же ширине входного отверстия степень осаждения изменяется лишь немного. При сохранении отношения ширины отверстия к диаметру циклона степень осаждения быстро падает с увеличением диаметра циклона.

Исследования показывают, что в циклонах образуются дополнительные потоки в виде кольцевых вихрей, исходящих от оси и поворачивающихся у стен обратно.

Побочные влияния: завихрения, уже имеющиеся в газе и усиливаемые трением о стенки, столкновения входящего и выходящего потоков и т. д. ухудшают очистку газа.

При исследовании [180] осаждения пыли в циклоне конструкции Даннеберга и Квандта диаметром в 800 *мм* были произведены измерения скорости газа по величине и направлению в 16 различных местах. Область наибольших скоростей находилась на расстоянии 200—250 *мм* от стенок, что является характерным для смерчей. Часть загрязненного газа покидала аппарат непосредственно за входом в циклон.

Повышение скорости сверх определенной величины (до 14 против 11 *м/сек*) имело следствием ухудшение очистки.

При прочих равных условиях увеличение густоты пыли дает увеличение степени осаждения вследствие увлечения малых частиц большими. При содержании пыли в газе до циклона в 5,8; 8,7 и 23,5 *г/м*^{3} выделялось 49, 65 и 84% всей пыли.

Степень очистки составляла для угольной пыли с наибольшей величиной частиц в 200 μ около 85% и для более крупных — около 90%.

Опыты с циклонными пылеуловителями дают возможность заключить, что практически полное осаждение возможно лишь для грубой пыли — размером более 100 μ.

Исследование [177] циклонных пылеуловителей цилиндрической удлиненной формы с винтообразными газоходами показывает, что в части первого оборота наблюдается потенциальное вращение газа, после поворота на 180° переходящее к вращению по закону твердого тела, имеющему место в средней части циклона. Потенциальное вращение наблюдается иногда и в нижней части при переходе газа из цилиндрической части в коническую. При первом повороте скорость несколько падает сравнительно со входной (примерно на 15%), и в дальнейшем средняя скорость в различных сечениях мало изменяется и составляет примерно 0,7 от входной скорости. Статическое давление в горизонтальном сечении падает от стенок циклона к центральной трубе; оно падает также и книзу.

Исследование цилиндрического циклона удлиненной формы с D = =1200 и 800 *мм* при высоте цилиндрической части в 2800 и конической — в 1500 *мм* показало в области потенциального вращения в верхней части изменение скорости от 16 *м/сек* у внешней стенки до 22 *м/сек* — у центральной трубы. В нижних сечениях наблюдалось выравнивание скоростей по сечению, и в самых нижних — резко выраженное увеличение скорости от внутренней трубы к внешней стенке циклона: от 7 до 15 *м/сек*. Статическое давление падало от внешней стенки к центральной трубе больше всего в верхнем обороте, а в среднем — с 23 до 16 *мм* вод. ст.

В другом подобного типа пылеуловителе бо́льших размеров в нижней части, вблизи поворота в центральную трубу, наблюдался переход к потенциальному вращению, причем средняя скорость газа увеличивалась до размеров входной скорости (18 *м/сек*).

При малой высоте цилиндрической части распределение скоростей и в цилиндрической и в конической частях сохраняет потенциальный характер.

В конусе пылеуловителя винтообразный ход газа изменяется на обратный и продолжается в центральной трубе.

По оси пылеуловителя в нижней части, под центральной трубой, иногда наблюдается зона отрицательного давления, что при выпуске пыли может вызвать подсос воздуха.

Исследования показывают, что увеличение высоты рабочей части циклона (в пределах до шестикратной высоты газового потока) увеличивает степень очистки и что уменьшение глубины опускания центральной трубы ухудшает очистку (ее следует доводить до конической части).

При достаточно целесообразной конструкции пылеуловителей результаты очистки могут быть лучше вышеприведенных. Так при испытании цилиндрического удлиненного циклона очистка воздуха от мелкой (56% с размером менее 80 μ) и легкой (уд. вес 0,2) пробковой пыли составляла при различной запыленности 93,6—95,7% при сопротивлении в 8,8 *мм* вод. ст. и от угольной пыли—97 — 99,6%.

Вязкость газа

На выделение пыли из газового потока в значительной мере влияет вязкость газа, возрастющая с температурой и равная:

$$\eta_t = \eta_0 \frac{1 + \frac{c}{273}}{1 + \frac{c}{T}} \sqrt{\frac{T}{273}},$$

где η_t — вязкость газа при $t°$ С и 760 *мм* в пуазах,
η_0 — вязкость газа при 0° С и 760 *мм* в пуазах,
c — постоянная, определенная для каждого газа,
T — абсолютная температура газа.

Значения вязкости η_0, отдельных газов в абсолютных единицах и постоянных c приведены в табл. 79.

Таблица 79

Значение вязкости η_0 и постоянных c для различных газов в абсолютных единицах

	CO	CO_2	N_2	H_2	H_2O	O_2	CH_4	SO_2	Воздух
$\eta_0\ 10^4$	1,66	1,50	1,63	0,85	0,89	1,84	1,10	1,20	1,68
c	102	264	110	74	673	114	—	270	1,28

Умножением на 10^{-2} величин вязкости, приведенных в таблице, получаем значения вязкости в *кг сек/м²*.

В вязкости смеси отдельные газы участвуют соответственно своему объему, т. е., если вязкость отдельных газов η_1, η_2, η_3.., η_n и содержание этих газов в единице объема V_1, V_2, V_3..., V_n, то вязкость смеси будет равна (приближенно):

$$\eta = V_1 \cdot \eta_1 + V_2 \cdot \eta_2 + V_3 \cdot \eta_3 + \ldots + V_n \cdot \eta_n .$$

3. ОСУШКА И ОХЛАЖДЕНИЕ ГАЗА

Способы осушки

Осушка газа достигается обычно охлаждением его. Табл. 80 показывает, что в газе при определенной температуре может содержаться лишь определенное количество насыщенного водяного пара, быстро растущее с температурой. Если мы будет охлаждать газ, то при какой-то температуре пары воды, содержащиеся в нем, станут насыщенными и при дальнейшем понижении температуры газа пары воды будут конденсироваться. В газе будет оставаться лишь определенное количество водяного пара, соответствующее его температуре. Чем сильнее охлаждение газа, тем меньше водяного пара будет оставаться в газе. Табл. 80 указывает это остающееся количество водяного пара. Неко-

Таблица 80

Зависимость содержания насыщенного водяного пара в газе от температуры

Температура (в °С)	Парциальное давление водяного пара p (в *мм* рт. ст.)	Объемное содержание водяного пара при 760 *мм* рт. ст. (в %) $\frac{100 \cdot p}{760}$	Количество пара (в *г*) на 1 *м³* газа (0°С, 760 *мм* рт. ст.)		Температура (в °С)	Парциальное давление водяного пара p (в *мм* рт. ст.)	Объемное содержание водяного пара при 760 *мм* рт. ст. (в %) $\frac{100 \cdot p}{760}$	Количество пара (в *г*) на 1 *м³* газа (0°С, 760 *мм* рт. ст.)	
			влажного	сухого				влажного	сухого
0	4,6	0,61	4,8	4,9	51	97,2	12,8	103	118
1	4,9	0,64	5,2	5,2	52	102,1	13,4	108	125
2	5,3	0,70	5,6	5,6	53	107,2	14,1	113	132
3	5,7	0,75	6,0	6,1	54	112,5	14,8	119	140
4	6,1	0,80	6,4	6,5	55	118,0	15,5	125	148
5	6,5	0,86	6,9	7,0	56	123,8	16,3	131	156
6	7,0	0,92	7,4	7,5	57	129,8	17,1	137	166
7	7,5	0,99	7,9	8,0	58	136,1	17,9	144	175
8	8,0	1,05	8,5	8,6	59	142,6	18,8	151	186
9	8,6	1,13	9,1	9,2	60	149,4	19,7	158	197
10	9,2	1,21	9,7	9,9	61	156,4	20,6	165	208
11	9,8	1,29	10,4	10,5	62	163,8	21,5	173	221
12	10,5	1,38	11,1	11,3	63	171,4	22,5	181	234
13	11,2	1,47	11,9	12,1	64	179,3	23,6	190	248
14	12,0	1,58	12,7	12,9	65	187,5	24,8	198	263
15	12,8	1,68	13,5	13,8	66	196,1	25,8	207	280
16	13,6	1,79	14,4	14,7	67	205,0	27,0	217	297
17	14,5	1,91	15,4	15,7	68	214,2	28,2	226	315
18	15,5	2,04	16,4	16,7	69	223,7	29,4	236	335
19	16,5	2,17	17,4	17,8	70	233,7	30,7	247	357
20	17,5	2,30	18,5	19,0	71	243,9	32,1	258	380
21	18,7	2,46	19,7	20,2	72	254,6	33,5	269	405
22	19,8	2,60	21,0	21,5	73	265,7	35,0	281	432
23	21,1	2,77	22,3	22,9	74	277,2	36,5	293	461
24	22,4	2,94	23,7	24,4	75	289,1	38,0	306	493
25	23,8	3,13	25,1	26,0	76	301,4	39,7	319	528
26	25,2	3,31	26,7	27,6	77	314,1	41,3	332	566
27	26,7	3,51	28,3	29,3	78	327,3	43,1	346	608
28	28,3	3,72	30,0	31,1	79	341,0	44,9	361	654
29	30,0	3,95	31,8	33,1	80	355,1	46,7	375	705
30	31,8	4,18	33,6	35,1	81	369,7	48,6	391	761
31	33,7	4,43	35,6	37,3	82	384,9	50,6	407	825
32	35,7	4,70	37,7	39,6	83	400,6	52,7	424	896
33	37,7	4,96	39,9	42,0	84	416,8	54,8	441	976
34	39,9	5,25	42,2	44,5	85	433,6	57,0	458	1 070
35	42,2	5,55	44,6	47,3	86	450,9	59,3	477	1 170
36	44,6	5,87	47,1	50,1	87	468,7	61,6	496	1 290
37	47,1	6,20	49,8	53,1	88	487,1	64,1	515	1 440
38	49,7	6,54	52,5	56,2	89	506,1	66,6	535	1 600
39	52,4	6,89	55,4	59,6	90	525,8	69,2	556	1 800
40	55,3	7,28	58,5	63,1	91	546,1	71,9	577	2 050
41	58,3	7,67	61,7	66,8	92	567,0	74,6	600	2 360
42	61,5	8,09	65,0	70,8	93	588,6	77,4	622	2 760
43	64,8	8,53	68,5	74,9	94	610,9	80,4	646	3 290
44	68,3	8,99	72,2	79,3	95	633,9	83,4	670	4 040
45	71,9	9,46	76,0	84,0	96	657,6	86,5	696	5 160
46	75,7	9,96	80,0	88,8	97	682,1	89,8	721	7 040
47	79,6	10,5	84,2	93,0	98	707,3	93,1	748	10 800
48	83,7	11,0	88,5	99,5	99	733,2	96,5	775	22 000
49	88,0	11,6	93,1	105	100	760,0	100,0	804	∞
50	92,5	12,2	97,8	111					

торое количество влаги может увлекаться при осушке в виде механической примеси к газу. При осушке газа с помощью охлаждения водой в газе остается некоторое количество влаги, которая может вызвать неполадки, например обмерзание газопровода. Имеется несколько способов полной осушки газа.

При компрессии газа пары воды конденсируются, и вода может быть удалена. Способ этот дорог и пригоден в случае необходимости компрессии газа по технологическим условиям или для целей его транспорта. При этом способе осушки из газа также удаляются легкие масла.

Влага газа может быть удалена и химическим путем — обработкой газа различными реагентами, например хлористым кальцием. Этот способ наиболее дешев.

Глубокое охлаждение газа, освобождающее почти полностью газ от влаги, является дорогой операцией и используется для выделения из газовой смеси отдельных газов.

Охлаждение газа

Газ обычно охлаждается до 35—45°, его влагосодержание при этой температуре соответствует, согласно табл. 80, при 45° — 84 *г/м*³ (0°, 760 *мм*) и при 35° — 47 *г/м*³ (0°, 760 *мм*).

Для охлаждения газа применяют или поверхностные холодильники или холодильники с непосредственным соприкосновением газа и воды.

Для частичного охлаждения газа могут снабжаться охлаждающими устройствами и отдельные участки газопроводов. Так например вертикальный или наклонный отрезок газопровода за генераторами снабжают распылителями воды или заключают в рубашку, в которой проходит паровоздушная смесь, нагревающаяся и охлаждающая газ.

При охлаждении газа помимо влаги конденсируются также смолистые вещества и промывка газа вызывает выделение из него смолистых веществ и пыли.

Охлаждение газа происходит также в газопроводах, особенно нефутерованных.

Поверхностные холодильники

В поверхностных холодильниках охлаждение газа происходит за счет отдачи тепла газа через стенки трубок омывающим их воде или воздуху. На рис. 171 представлен подобный холодильник. В нем вода протекает по трубкам, а газ — снаружи. Обычно газ и вода текут в противоположных направлениях, и таким образом наиболее охлажденный газ встречает наиболее холодную воду, и наоборот, чем достигается лучшая теплоотдача (противоток). Так как теплопередача в поверхностных холодильниках происходит не непосредственным соприкосновением газа и воды, то эти охладители изготовляются больших размеров, требуется большая поверхность трубок и большой расход воды и кроме того чистка засаривающихся смолой трубок затруднительна. Достоинством этих холодильников является то, что смола, выделяющаяся в них, смешана только с небольшим количеством сконденсировавшейся из газа влаги и легко может быть удалена, а большое количество охлаждающей воды остается чистым.

Поверхностные холодильники выполняют с вертикальным и горизонтальным расположением труб.

Холодильники с вертикальными трубами дешевле и удобнее для чистки. Часто они разделяются в верхней части долевой перегородкой на два отделения. Вода поступает в одно из отделений, стекает по трубам в двойное дно и поднимается по трубам во второе отделение.

В холодильниках с горизонтальными трубами обыкновенно имеются для отдельных групп труб соединительные камеры, через которые вода переходит из одного пучка труб в другой. Потребная поверхность охлаждения в этих холодильниках на 20—25% меньше, чем в холодильниках с вертикальными трубками вследствие лучших условий теплопередачи.

Диаметр труб в поверхностных вертикальных холодильниках [181] берут 50 *мм* в малых и 75 *мм* в больших; длину — равной 80-кратному диаметру. При высоте такого холодильника в 3 *м* и диаметре 750, 900, 1000, 1200, 1400, 1500 *мм* поверхность охлаждения составляет соответственно: 18,5; 30,5; 36,5; 54,0; 72 и 107 *м*² и добавочная поверхность на каждый метр высоты: 6; 9,9; 11,8; 17, 6; 23,5 и 34,8 *м*². Отношение высоты к диаметру холодильника колеблется в пределах от 2 до 5.

Холодильники, в которых тепло передается воздуху через трубки, в генераторных установках не применяются ввиду их громоздкости, связанной с малой величиной коэфициента теплоотдачи от стенок к воздуху.

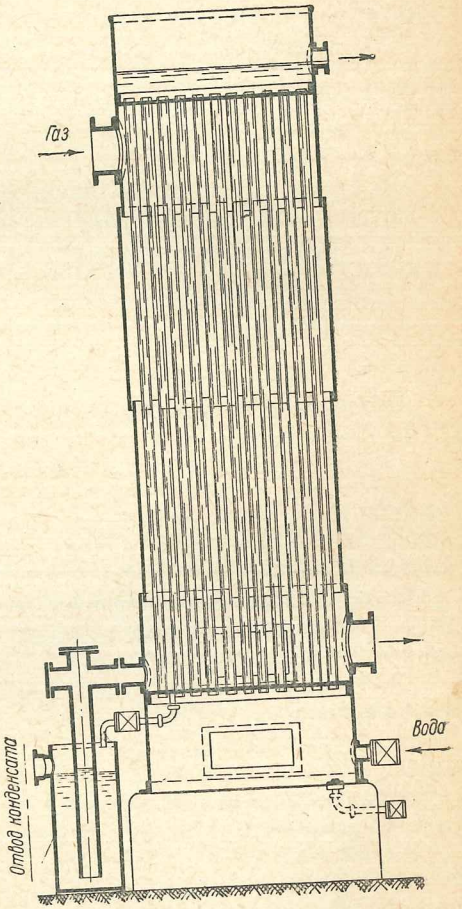


Рис. 171. Трубчатый холодильник

При заданных температурах входа и выхода газа и воды поверхность холодильника $F м^2$ может быть определена из выражения:

$$Q = kF\,\Delta t_m,$$

где Q — количество передаваемого тепла в *кал/час*,
k — коэфициент теплопередачи от газов к воде в *кал/м*² °С,
Δt_m — средняя разность температур газа и охлаждающей воды в °С.

Для трубчатых холодильников количество передаваемого тепла часто выражается через длину труб L *м*, а именно:

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i D_i} + \frac{2{,}303 \lg \frac{D_a}{D_i}}{2\lambda} + \frac{1}{\alpha_a D_a}} \cdot \pi L \Delta t_m,$$

где α_i — коэфициент теплоотдачи от газов к стенке в *кал/м² час* °С,
α_a — коэфициент теплоотдачи от воды к стенке в *кал/м² час* °С,
D_a — внешний диаметр труб в *м*,
D_i — внутренний диаметр труб в *м*,
λ — коэфициент теплопроводности материала стенки в *кал/м час* °С.

В случае прямотока и противотока, если в отдельных стадиях охлаждения температуры газа и воды в начале холодильника t_1 и t'_1 и температуры в конце холодильника t_2 и t'_2, то средняя разность температур равна:

$$\Delta t_m = \frac{(t_1 - t'_1) - (t_2 - t'_2)}{2{,}303 \lg \frac{t_1 - t'_1}{t_2 - t'_2}}.$$

В случае перекрестного потока средняя разность температур приближенно равна:

$$\Delta t_m = \frac{t_1 - t'_1 + t_2 - t'_2}{2},$$

где t_1 и t'_1 — температуры входящих газа и воды,
t_2 и t'_2 — средние температуры выходящих газа и воды.

Если в подобных теплообменниках один поток движется зигзагообразно по отношению к другому, то пользуются формулами для противоточного теплообменника.

В общем случае процесс охлаждения газа в поверхностном холодильнике может протекать следующим образом:

1. Входящий газ, имеющий температуру выше точки росы, соприкасается со стенками, имеющими температуру также выше точки росы газа; теплоотдача происходит от газов в стенке конвекцией и лучеиспусканием и от труб к воде конвекцией.

2. Температура стенки понижается ниже точки росы газа, температура газа остается выше точки росы; примущественное значение в теплоотдаче от газов к стенке начинает играть теплоотдача от конденсирующегося перегретого пара.

3. Температура газа понижается ниже точки росы; преимущественное значение в теплоотдаче от газов к стенке начинает играть теплоотдача конденсирующегося насыщенного водяного пара.

Ниже рассматриваются отдельные случаи теплопередачи [134].

В отношении оценки теплоотдачи от воды к стенке трубы возможно пользоваться данными исследований В. Штендера. Согласно этим исследованиям над железными и латунными трубками диаметром в 18 и 28 *мм*, решающее влияние на теплоотдачу от воды к стенке трубки имеет температура воды и теплоотдача не зависит от диаметра трубки, материала, направления потока жидкости и теплового потока (от воды к стенке, и наоборот). В упрощенном виде выражение для коэфициента теплоотдачи от воды к стенке α_1 по А. Шаку имеет следующий вид:

$$\alpha_1 = 2900\, v^{0{,}85} (1 + 0{,}014\, t_в),$$

где v — скорость воды в *м/сек*,
$t_в$ — средняя температура воды в °С.

При скорости воды в 1,2 *м/сек* и средней температуре ее в 50°

$$\alpha_1 = 2900 \cdot 1{,}2^{0{,}85} (1 + 0{,}014 \cdot 50) = 5700 \text{ кал/м² час °С}.$$

Коэфициент теплоотдачи для конденсирующегося водяного пара, не содержащего газа, α_2 может быть принят равным в пределах до 10 000 *кал/м² час* °С в зависимости от приспособления конструкции к отводу конденсата.

Согласно работам Нуссельта, коэфициент теплоотдачи от насыщенного пара к вертикальной стенке, или трубкам $\alpha_в$ *кал/м² час* °С, с высотой h*м* при температуре пара $t_д$ и стенки t_w, составляет:

$$\alpha_в = \frac{5\,800 + 23\,(t_д + t_w)}{\sqrt{h\,(t_д - t_w)}}.$$

Так средний коэфициент теплоотдачи в вертикальной трубке высотой в 2 *м* при температуре пара 180° и стенки 120° составит:

$$\alpha_в = \frac{5800 + 23 \cdot 300}{\sqrt[4]{2 \cdot 60}} = 3830 \text{ кал/м² час °С}.$$

В случае горизонтальных труб условия стекания конденсата значительно лучше. Нуссельт дает следующее соотношение коэфициентов $\alpha_в$ и $\alpha_г$ при вертикальных и горизонтальных трубках:

$$\frac{\alpha_г}{\alpha_в} = 0{,}770 \sqrt[4]{\frac{h}{d}},$$

где d — диаметр трубок в *м*,
h — их длина в *м*.

Из этого соотношения получаем, что

$$\alpha_г = \frac{4460 + 17{,}7\,(t_д + t_w)}{\sqrt[4]{d\,(t_д - t_w)}}.$$

Из соотношения коэфициентов при горизонтальных и вертикальных трубках видно, что коэфициент теплоотдачи при горизонтальном положении меньше, чем при вертикальном, только для трубок, диаметр которых близок к длине или меньше таковой. Так как в обычных условиях длина труб значительно больше их диаметра, то и коэфициент теплоотдачи для горизонтальных труб значительно больше, чем для вертикальных.

Для приведенного выше примера при диаметре труб в 36 *мм* получим:

$$\alpha_г = \frac{4460 + 17{,}7 \cdot 300}{\sqrt[4]{0{,}036 \cdot 60}} = 8000 \text{ кал/м² час °С}.$$

Из приведенного следует, что более благоприятным положением труб при конденсации пара является горизонтальное, причем конденсация очевидно должна происходить снаружи, чтобы конденсат мог стекать.

Указанные выше коэфициенты относятся к случаю отсутствия неконденсирующихся газов в смеси с паром. Наличие такой примеси понижает коэфициент теплоотдачи: при 10% неконденсирующихся газов коэфициент теплоотдачи понизится на 25%, при 35% — на 55%, при 50% — на 75%, при 70% — на 85% и при 80%—на 90%.

Теплоотдача от конденсирующихся паров других веществ значительно ниже — так для паров бензола в 6—7 раз.

Что касается работы той части теплообменников, в которых газ имеет температуру выше точки росы, то теплоотдача в этой части в значительной мере зависит от того — выше или ниже точки росы температура стенки. В случае конденсации водяного пара у стенки происходит значительное повышение теплоотдачи. По опытам Якоба и Ерка, теплоотдача при конденсации перегретого водяного пар больше теплоотдачи конденсирующегося насыщенного пара при том же давлении. Следовательно приведенными выше значениями коэфициентов теплоотдачи можно пользоваться с запасом.

В случае, если температура газов и охлаждающей воды высока и влагосодержание газов мало, может потребоваться большая площадь холодильника для понижения температуры газов настолько, чтобы началась конденсация водяного пара.

Для определения размера этой части холодильника можно руководствоваться следующими соображениями.

Коэфициент теплоотдачи от газов к стенке α в этом случае слагается из двух величин: коэфициента теплоотдачи конвекций $\alpha_к$ и коэфициента теплоотдачи лучеиспусканием $\alpha_л$.

Коэфициент теплоотдачи конвекцией в трубах $\alpha_к$ определится из выражений [134, 182]:

при ламинарном движении газов:

$$\alpha_к = \frac{1{,}9}{d^{0{,}53}} \quad кал/м^2\,час\,°C;$$

при турбулентном движении:

$$\alpha_к = \frac{3w_0^{0{,}8}}{\sqrt[4]{d}},$$

где d — диаметр канала, по которому движутся газы, в $м$; при некруглом сечении:

$$d = \frac{4f}{U},$$

где f — площадь каналов для газов в $м^2$,

U — периметр каналов для газов в $м$,

w_0 — скорость газов, отнесенная к нормальному объему.

С известным приближением указанными значениями $\alpha_к$ можно пользоваться и при подсчете теплоотдачи для пучка труб. Шаком для случая протекания газов через систему из пяти рядов труб дается:

для коридорного расположения труб:

$$\alpha_к = \frac{4{,}55w_0^{0{,}654}}{d^{0{,}346}}$$

и для шахматного расположения труб:

$$\alpha_к = \frac{7{,}0 \cdot w_0^{0{,}69}}{d^{0{,}31}}.$$

Коэфициент теплоотдачи лучеиспусканием имеет значительную величину при высоких температурах газов и при наличии в них углекислоты и водяного пара.

Излучение углекислоты и водяного пара зависит от величины

$$c = ps,$$

где p — парциальное давление CO_2 или H_2O в долях атмосферы,

s — толщина излучающего газового слоя в $м$.

Величины излучения могут быть определены по данным Шака, [134], представленным для удобства пользования в виде соответствующих диаграмм для абсолютно черного тела.

Практически величины, полученные по диаграммам, несколько больше действительных ввиду поглощения части тепла более холодными слоями газа, находящимися у труб, и взаимного поглощения излучения углекислоты и водяного пара.

Скрубберы

Охладители с непосредственным соприкосновением газа и воды представляют собой прямоугольные или круглые (обычно круглые) башни, называемые скрубберами.

Скрубберы могут быть заполнены насадкой, разбивающей воду на множество мелких струек, или они могут иметь разбрызгивающие поверхности или же в них вода может мелко распыливаться с помощью специальных распылителей.

Скрубберы представлены на рис. 129, 172, 181 и 182.

Газ входит в скруббер в нижней части, поднимается в выходит вверху. Промывающая вода течет сверху и специальным приспособлением распределяется по всему сечению. Для уменьшения механического уноса капелек воды из скрубберов в них выше смачиваемых водой секций насадки иногда предусматривают дополнительную секцию, удерживающую капельки воды. Для этой же цели устанавливают у газоотводных штуцеров листы, отклоняющие газ, или же располагают разбрызгивающие воду приспособления значительно ниже указанных штуцеров. Собирающаяся в нижней части вода стекает снизу через гидравлический затвор.

Отведение этой воды в водоемы допустимо лишь после очистки, весьма затруднительной в случае смолистого газа. Обычно она циркулирует в системе, и только часть ее после соответствующей

очистки удаляется из пределов станции. Улавливание в целях использования смолы в этом случае труднее, так как часть смолы теряется с водой, а уловленная является сильно обводненной.

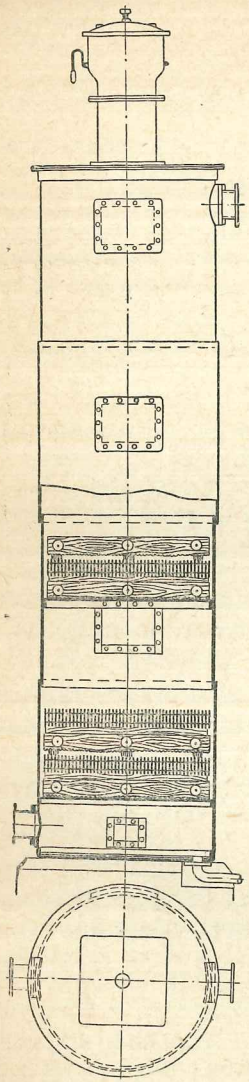


Рис. 172. Скруббер с хордовой насадкой

Заполнение скрубберов

Скрубберы часто заполняют специальными, имеющими большую поверхность телами, причем образуется большая поверхность соприкосновения между промывающей жидкостью и газами (рис. 172 и 203). Этими телами являются кокс, кольца Рашига и т. п. Коксовая насадка дешева, но быстро засоряется. Применяют в качестве насадок и деревянные решетки (хордовая насадка). Последние (рис. 172) набирают из деревянных, прямоугольного сечения (нестроганых — для замедления стекания воды), реек, обычно толщиной в 6—20 *мм* и высотой в 100—120 *мм*, прокладывают между рейками пластинки толщиной в 12—25 *мм* и стягивают их болтами. Решетки кладут таким образом, чтобы одна решетка (один ряд) лежала перпендикулярно к другой, что увеличивает путь газа и поверхность орошения. Иногда для увеличения поверхности орошения применяют рейки в виде треугольников со сторонами в 25 *мм*. Деревянные рейки снабжают зубчатыми вырезами в нижней части, чем достигается равномерное стекание воды по длине рейки.

Кольца Рашига, служащие для заполнения скрубберов, представляют собой керамические или из иного материала кольца—цилиндрики с высотой, приблизительно равной диаметру (30—60 *мм*). При этом соотношении высоты и диаметра кольца ложатся в полном беспорядке, и свободных проходов для газа не образуется. Каждое кольцо изменяет направление течения газа и жидкости, что в значительной мере увеличивает путь прохождения газа и воды, поверхность их соприкосновения и равномерность распределения по сечению.

С помощью кокса создается промывная поверхность площадью в 30 $м^2$ и более на 1 $м^3$ скруббера; особенно большая поверхность создается с помощью колец Рашига.

1 $м^3$ кокса размером 75 *мм* имеет поверхность 42 $м^2$ и свободный объем в 44%. Поры кокса быстро забиваются пылью.

1 $м^3$ хордовой насадки из прямоугольных реек размером 12,5×100 *мм* с расстоянием между рядами в 20 *мм* образует при

расстоянии между рейками 25, 12 и 10 *мм* поверхность в 50, 57 и 89 $м^2$.

1 $м^3$ треугольных реек с сечением 30×30×30 *мм* и расстоянием между рейками в 30 *мм* и между рядами реек в 12,5 *мм* образует поверхность в 78 $м^2$.

В табл. 81—82 приведены данные о поверхностях, создаваемых хордовой насадкой и кольцами Рашига [183].

Таблица 81

Размеры скрубберов с хордовой насадкой

Диаметр кожуха (в *мм*)	1 600	1 800	2 000	2 300	2 600	3 000
Толщина стен кожуха (в *мм*)	6	6	6—7	6—7	7—8	7—8
Толщина железа днищ (в *мм*)	10	10	10	12	12	12
Диаметр газовых штуцеров (в *мм*)	250 350	250 350	300 400	400 500	550 600	800—700—600
Диаметр штуцера для выпуска жидкости (в *мм*)	70	100	100	100	100	100
Промывная поверхность 1 ряда насадки (в $м^2$)	19,2	21,5	26,5	35	45	60
Вес 1 ряда насадки (в *кг*)	65,5	83,0	103,0	136,0	175,0	230,0

Высота скруббера (в *мм*)	Количество рядов насадки	Промывная поверхность (в $м^2$)					
6300	30	576	645	—	—	—	—
6800	33	633	709	—	—	—	—
7300	36	691	774	—	—	—	—
7300	37	—	—	—	—	—	—
7800	39	749	838	—	—	—	—
7800	40	—	—	—	—	—	—
8700	41	—	881	—	—	—	—
10100	49	—	—	1 298	—	—	—
10100	50	—	1 075	—	—	—	—
11600	53	—	—	—	1 855	—	—
11600	58	—	—	1 537	—	—	—
11600	59	—	1 268	—	—	—	—
13100	62	—	—	—	2 170	—	—
—	64	—	—	1 696	—	—	—
—	65	—	1 397	—	—	—	—
14400	68	—	—	—	—	3 060	—
—	71	—	—	—	2 485	—	—
—	72	—	—	1 908	—	—	—
—	73	—	1 569	—	—	—	—
17400	86	—	—	—	—	—	—
—	87	—	—	—	—	—	5 160
—	90	—	—	—	—	3 195	—
—	91	—	—	—	3 150	—	—
20200	98	—	—	2 411	—	—	5 880
—	99	—	—	—	—	4 455	—
—	102	—	—	—	3 570	—	—
—	117	—	—	—	—	—	7 020
23200	118	—	—	—	—	5 310	—

Таблица 82

Данные о кольцах Рашига

Кольца	Высота кольца (в *мм*)	Внешний диаметр (в *мм*)	Толщина стенок (в *мм*)	Вес 1 $м^3$ колец (в *кг*)	Поверхность, образуем. 1 $м^3$ заполнения кольцами (в $м^2$)
Из жести	15	15	0,5	650	345
» »	25	25	0,8	630	220
» чугуна	25	25	2,0	1400	200
» »	50	50	3,0	1100	110
» фарфора	15	15	2,0	660	336
» »	25	25	2,0	570	220
» »	35	35	3,0	500	162

Распределительные приборы для воды

Конструкции распределителей воды вверху скруббера разнообразны. Они иногда представляют собой разбрызгивающие сопла, иногда стаканы или трубки, снабженные отверстиями (рис. 129), иногда приспособления с поверхностями, направляющими воду, иногда же вращающиеся, распределяющие воду приспособления. Возможно применение капельных приборов (рис. 173), в которых струя воды, падая

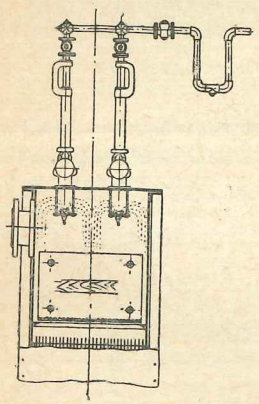


Рис. 173. Капельный прибор

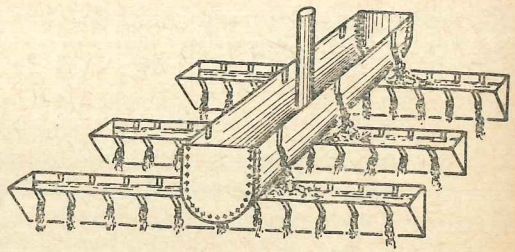


Рис. 174. Распределительные корыта для воды

с определенной высоты (не менее 1 *м*), ударяется о специальную поверхность и разбивается на мелкие брызги, орошающие насадку. Имеются конструкции (рис. 174), в которых распределительный прибор состоит из железных или деревянных корыт. Большое корыто снабжено на определенных равных расстояниях прорезями. Через последние вода выливается в меньшие корытца, расположенные под углом в 90° к главному корыту и приходящиеся под его отверстиями. Малые корытца имеют многочисленные отверстия, через которые вода выливается и орошает насадку.

Вода может впрыскиваться в скруббер и в мелкораспыленном виде. Для этой цели ее выпускают под давлением из специальных распылителей-пульверизаторов.

Распылители-пульверизаторы

Принцип действия распыливающего увлажнителя-пульверизатора заключается в том, что жидкость, подводимая под значительным давлением (около 3 *ат*), выходит из сопла с большой скоростью в виде тонкой струйки, имеющей вращательное движение и состоящей из вращающихся и скручивающихся спиралей.

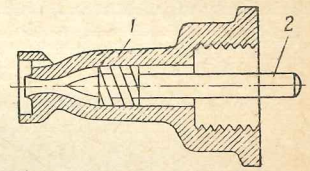


Рис. 175. Форсунка Кертинга

При выходе с большой скоростью из сопла, вращающиеся струйки жидкости под действием силы трения, возникающей на поверхности раздела фаз, турбулентности и центробежной силы, разбиваются на мельчайшие частицы, величина которых зависит от скорости выхода. На рис. 175 и 176 представлены подобные распылители.

Распылитель Кертинга (рис. 175) состоит из наконечника *1* и стержня *2*. На стержне сделана винтовая прямоугольная резьба, которая, прилегая плотно к внутренней поверхности наконечника, образует винтовые ходы. Стержень на конце заострен, и его наружная

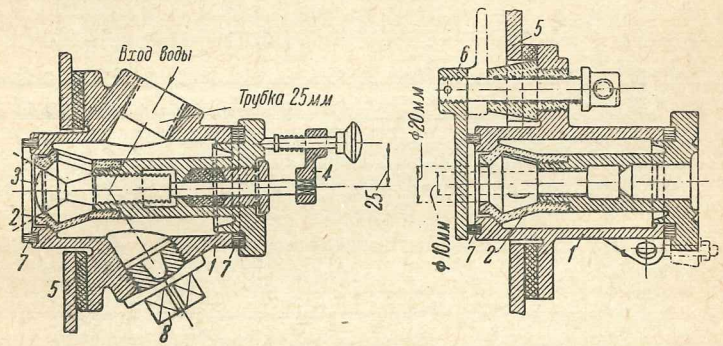


Рис. 176. Форсунка большой производительности:

1—кожух, *2*—корпус, снабженный отверстием для входа воды, *3*—регулирующий стержень, *4*—указатель положения стержня, *5*—крышка скруббера, *6*—заглушка, *7*—резиновая прокладка, *8*—пробка

поверхность соответствует внутреннему очертанию наконечника. Вода, проходя под давлением через винтовую нарезку, приобретает вращательное движение. Она распыляется благодаря силе трения и центробежной силе при выбросе с большой скоростью и в завихренном состоянии из сопла. Наконечник имеет выходное отверстие в 1, 1,5 и 2 *мм*.

К числу мощных пульверизаторов относится форсунка, показанная на рис. 176. В ней изменение производительности достигается регулированием положения центрального стержня, а следовательно

и образующейся кольцевой щели, через которую вытекает находящаяся под значительным давлением вода. Стержень с внешней стороны снабжен указателем открытия щели. Металлический корпус форсунки прикрепляется к скрубберу фланцами. Внутренность форсунки легко вынимается из корпуса. Очистка форсунки возможна на ходу (закрывание выходного отверстия со стороны скруббера заглушкой) [1].

Форсунка большой производительности испытывалась Ленинградским отделением Газогенераторстроя. При испытании определялись: зависимость расхода воды от величины напора и открытия

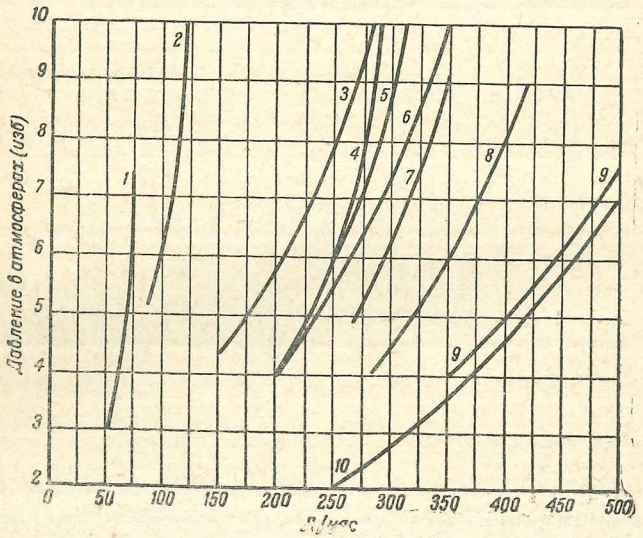


Рис. 177. Диаграмма зависимости производительности пульверизатора на воде от давления воды и типа форсунок:

1—«Coen» малой производительности и Трейера, *d* сопла—0,8 *мм*; *2*—Григорьева, *d* сопла—1,5 *мм*; *3*—Верморели, *d* сопла—1,8 *мм*; *4*—Григорьева, *d* сопла—2,5 *мм*; *5*—«Coen» высшей производительности; *6*—винтовой—Варганова (сталь), *d* сопла—3,5 *мм*; *7*—винтовой Варганова (бронза), *d*—сопла—3,5 *мм*; *8*—Бабкок-Вилькокс, *d* сопла—3,5 *мм*; *9*—Бабкок-Вилькокс, *d* сопла—$3^5/_8$ *мм*; *10*—Григорьева, *d* сопла—$3^5/_8$ *мм*

щели, пределы регулировки расхода, дальнобойность струи, угол рассеяния струи, а также качество распыления. Исследование показало, что увеличение открытия щели свыше чем на 2 оборота стержня не увеличивает производительности. Дальнобойность струи зависит от напора, изменяясь при колебаниях напора от 5 до 36 *м* в пределах от 1 до 4,5 *м*. Наименьший напор, при котором форсунка в горизонтальном положении дает правильную и равномерную коническую струю, составляет примерно 15—20 *м*. При меньших напорах вытекающая струя имеет неправильную форму, длину в 2—2,5 *м* и

[1] Сконструирована для работы на известковом растворе, при котором обычные форсунки неудобны ввиду быстрого засорения и трудности очистки.

состоит из крупных капель. При давлениях больше 15—20 *м* длина струи колеблется в пределах 2,5—4,5 *м*, причем с увеличением напора степень распыления увеличивается. При давлении в 30 *м* на расстоянии 1 *м* от выходного отверстия диаметр капель не превосходил 0,25 *мм*. При давлении выше 20 *м* форсунка имела производительность до 4 $м^3$ воды в час, лимитировавшуюся размером канала для воды в теле форсунки. Производительность может быть значительно увеличена путем увеличения размеров этого канала или количества каналов.

Дальнобойность и конусность струи, а также степень распыления удовлетворяют условиям, предъявляемым охлаждающими аппаратами газогенераторных станций.

Зависимость производительности (184) пульверизаторов по воде от их типа и давления воды приведена на диаграмме рис. 177. При необходимости распыления большого количества воды применяют несколько распылителей. Размер капель воды зависит от давления воды, а также от конструкции разбрызгивающего приспособления. Диаметр капель *d* составляет примерно 0,05—1 *мм*.

Протекание процесса охлаждения газа и расход воды в скруббере

В скруббере происходит отдача тепла от газов к воде на поверхности их соприкосновения. Если температура газа выше точки росы, отдача тепла от газа вызывает испарение воды, пары которой диффундируют в газ до достижения газом состояния насыщения. При дальнейшем охлаждении газа происходит осушка газа — конденсация содержащегося в нем водяного пара, диффундирующего из насыщенного газа в более холодную воду. Размеры аппарата для осушки газа можно определить, или пользуясь учетом перехода тепла от газа к воде теплопередачей на поверхности соприкосновения, или учитывая диффузию водяного пара из газа к поверхности воды.

Тепловой эффект испарения или конденсации водяного пара не учитывается уравнением теплопередачи, если не считать влияния, оказываемого этими процессами на температуру воды и следовательно на среднюю температурную разность между газами и водой.

Теплопередача и диффузия связаны между собой определенными соотношениями, и скрубберы могут быть рассчитаны на основе учета любого из этих процессов.

При осушке газа тепло передается в глубь жидкости. Физическое тепло, отдаваемое газом, проходит пленки газа и жидкости, скрытое же тепло конденсирующегося пара, освобождающееся на поверхности соприкосновения обеих пленок, проходит только через жидкую пленку. Конденсирующийся пар должен продиффундировать через газовую пленку, и в пленке должна установиться разность парциальных давлений, достаточная, чтобы вызвать эту диффузию.

Расход охлаждающей воды G_{ox} *кг/час* определяется из теплового баланса охладителя. Если обозначить: Q_1 и Q_2 — теплосодержание часового количества соответственно входящего и выходящего газа, t_1 и t_2 — соответственно температуру входящей и выходящей охлаждающей воды, G_k — вес конденсата, то расход охлаждающей воды

G_{ox} *кг/час* можно определить, пренебрегая потерей в окружающую среду [1] из выражения:

$$Q_1 - Q_2 = G_{ox}(t_2 - t_1) + G_к\, t_2.$$

Пренебрегая обычно незначительной величиной $G_k t_2$, получаем расход охлаждающей воды:

$$G_{ox} = \frac{Q_1 - Q_2}{t_2 - t_1}.$$

Q_1 и Q_2 учитывают полное теплосодержание газа, т. е. слагаются из теплосодержания сухого газа и теплосодержания влаги газа, включая тепло конденсации.

Если в охладителе температура газа не снижается ниже точки росы для температуры входа, то происходит не конденсация из него влаги, а испарение части охлаждающей воды. Частью a испаренной охлаждающей воды при расчетах обычно задаются. Количество охлаждающей воды определяют из балансового выражения:

$$Q_1 + G_{ox} \cdot t_1 = Q_2 + G_{ox}(1 - a)\, t_2,$$

откуда

$$G_{ox} = \frac{Q_1 - Q_2}{(1 - a)\, t_2 - t_1}.$$

Величина Q_2 учитывает также теплосодержание испаренной воды.

Охлаждение газа при соприкосновении его с водой идет в двух стадиях: в первой стадии, когда газ не насыщен парами воды, происходит отдача газом тепла за счет испарения влаги, т. е. температура воды поднимается до тех пор, пока не установится динамическое равновесие, при котором приток тепла от газа к капле будет уравновешен затратой тепла на испарение воды с поверхности капли; во второй стадии, когда газ насыщен парами воды, отдача тепла воде происходит от газа и диффундирующего к воде и конденсирующегося водяного пара.

Если принять, что, пока газ не насыщен водяными парами, температура воды постоянна и все тепло расходуется на испарение, то температура газа t_x, до которой протекает процесс в первой стадии от начальной температуры газа t_1, определится из равенства:

$$(Vc + g_1 c_1)(t_1 - t_x) = g_2 [r + c_2 (t_x - t_w)],$$

где V — объем сухого газа в $м^3$ (0°, 760 *мм*),
c — средняя теплоемкость 1 $м^3$ газа,
g_1 — влагосодержание газа в *кг*,
c_1 — средняя теплоемкость водяного пара в интервале температур $t_1 - t_x$ в *кал/кг*,
c_2 — средняя теплоемкость водяного пара в интервале температур $t_x - t_w$ в *кал/кг*,
g_2 — количество испарившейся воды в *кг*,
r — теплота испарения водяного пара при температуре t_w нагретой воды в *кал/кг*.

[1] Потеря в окружающую среду скрубберами может быть определена или при помощи обычных формул теплопередачи или по данным Гаусбранда (185).

Задаваясь различными значениями температуры t_x, можно определить влагосодержание, соответствующее этой температуре.

Очень удобно нахождение этой температуры путем составления графика, на котором одна кривая дает количество влаги, насыщающее газ при различных температурах (по табл. 80, последняя графа), а другая кривая указывает количество испарившейся влаги g_2, определяемое по приведенной выше формуле для различных значений t_x, величиной которого задаются (например 50, 55, 60 и 65°). Пересечение кривых дает искомую величину t_x.

Скрубберы с насадкой

Скрубберы с насадкой служат как для охлаждения, так и для очистки газа от пыли. Они имеют преимущественное распространение в генераторных установках, хорошо справляются в обычных случаях со своей задачей и не требуют подачи охлаждающей воды под значительным давлением. В скрубберах большой производительности применяют насадки, имеющие большие удельные поверхности, в частности кольца Рашига. Для обеспечения равномерности смачивания кольца Рашига и другие насадки располагают слоями высотой не более 1 *м* и над каждым слоем распределяют специальными приспособлениями (ч. II, рис. 22) воду.

Недостатком этих скрубберов является их значительное сопротивление, возрастающее по мере загрязнения скруббера и вызывающее необходимость в их выключении для чистки.

Поверхность скруббера с насадкой определяется из выражения:

$$F = \frac{Q}{\Delta t k},$$

где F — поверхность насадки в $м^2$,
Q — количество тепла, отнимаемого от газа, в *кал/час*,
Δt — средняя разность температур в °С,
k — коэфициент теплоотдачи *кал/м² час* °С.

При наличии в скруббере насадки коэфициент теплоотдачи от газов к насадке в первой стадии — ненасыщенного влагой газа — колеблется в пределах 9—15 *кал/м² час* °С.

Для башен с досчатой и реечной насадкой количество тепла, передаваемое на 1 $м^3$ рабочего объема, в первой стадии составляет по Робинзону (186):

$$K_1 = 0{,}08\, V \text{ кал/м}^3 \text{ час °С},$$

где V — объем газа при действительной температуре в $м^3/час\, м^2$,
K_1 — колеблется в пределах 300 — 1000.

Для башни, насаженной коксом или другим кусковым материалом с размером зерен до 7 *см*, по данным Уитмана и Кейтса (187) при расходе воды до 6000 *кг* на 1 $м^2$ в час были получены для первой стадии — увлажения — результаты, удовлетворяющие уравнению:

$$K_I = 1152 + 1{,}38\, G \text{ кал/м}^3 \text{ час °С}$$

и для второй стадии — осушки:

$$K_2 = \frac{1}{\frac{1}{1{,}20 + 1{,}38\,G} + \frac{1}{0{,}215 \cdot 10^{-8}\,G^{1{,}8} \cdot w^{1{,}54}}},$$

где G — количество воздуха в *кг/м² час*,

w — количество воды в *кг/м² час*.

Коэфициенты теплопередачи для второй стадии были определены Розенбаугом и приведены на диаграммах рис. 178, 179 и 180 (186) для нефтяного газа.

Из опытов следует, что коэфициент теплопередачи в значительной степени зависит от скорости газа, температуры входящего газа и в некоторых пределах — от количества орошения.

Под количеством орошения понимается количество воды, приходящейся на 1 *пог. м* орошаемого ребра доски, или на 1 *м²* сечения скруббера. При увеличении количества воды до 2 *л/пог. м мин* коэфициент теплопередачи быстро возрастает, достигая максимума; при дальнейшем увеличении количества орошения значение коэфициента теплопередачи медленно понижается.

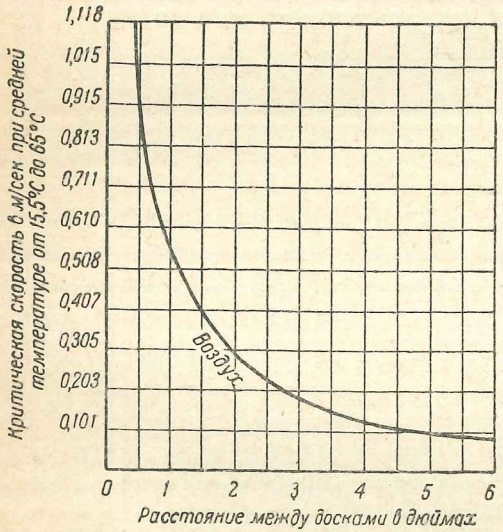


Рис. 178. Зависимость критических скоростей от расстояния между досками насадки скруббера для газа при средней температуре 15,5—65°

Увеличение количества орошающей воды имеет свой максимум, выше которого наступает переполнение (движение струями), вызывающее уменьшение конденсирующей и охлаждающей поверхности.

Максимум соответствует 7,5 *л/мин* на 1 *пог. м* ребра насадки при ширине промежутков между досками в 1,25 *см* и 10 *л/мин* при расстоянии в 2,5 *см* (187).

При ламинарном движении газа в скруббере коэфициент теплопередачи низок. При турбулентном движении коэфициент теплопередачи значительно выше, причем он растет пропорционально величине отношения действительной скорости к критической (действительная скорость отнесена к температуре выхода газа из скруббера). Значения критических скоростей в зависимости от расстояния между досками насадки скруббера для газа при средней температуре 15,5—65° приведены на рис. 178; влияние на коэфициент теплопередачи скорости и температуры входящего газа показано на рис. 179, 180.

Диаграммы приведены для случая температуры выхода газа, равной 15,5° С, тогда как обычная температура выходящего газа 25—30°. Так как с увеличением температуры выходящего газа значения коэфициента теплопередачи возрастают, диаграммы дают таковые лишь приближенно с запасом.

В целях уточнения коэфициента теплопередачи по данным Розенбауга для различных конечных температур газа и составов газа (188) предложена формула:

$$K_p = (1{,}006\,w_0 - 0{,}0946)\,PC - B\,(55{,}1\,w_0 - 34{,}4)\ \textit{кал/м² час °С},$$

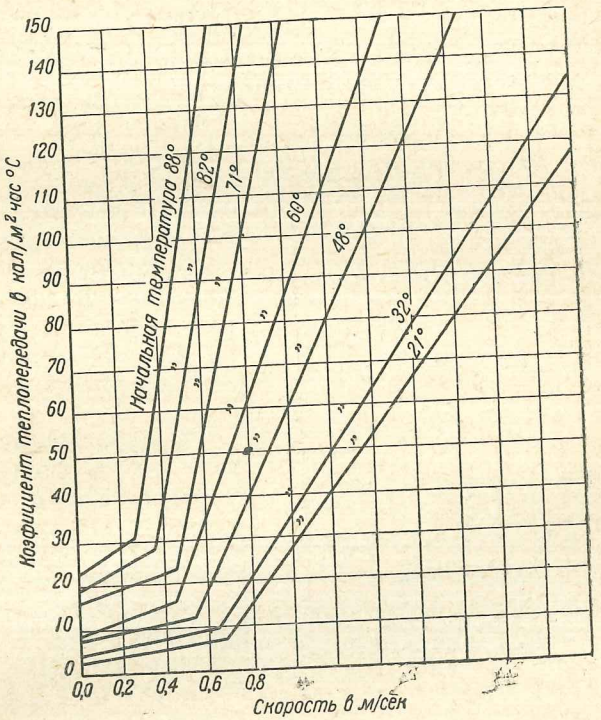


Рис. 179. Зависимость коэфициента теплопередачи от температуры и скорости входящего насыщенного водяными парами газа

где P — начальное парциальное давление водяного пара в газе в *мм* рт. ст.,

w_0 — скорость сухого газа, приведенная к нормальным условиям.

Численные значения коэфициентов C и B приведены в табл. 83.

Таблица 83

Значения коэфициентов

Наименование газов	C	B
Нефтяной	1,00	1,0
Коксовальный	1,00	1,0
Водяной	0,99	0,85
Генераторный, смешанный	0,98	0,5
Воздух	0,93	0,3

Приведенное уравнение позволяет установить величину коэфициента для любого элемента насадки скруббера по состоянию находящегося около него насыщенного пара. При подсчетах по этому уравнению необходимой поверхности теплообмена возможно воспользоваться методом графического логарифмирования или расчетом среднего логарифмического значения коэфициента теплопередачи при входе и выходе газа, что менее точно.

В соответствии с условиями опытов, на основе которых выведено это уравнение, оно может быть использовано для расчетов процесса охлаждения насыщенного газа в скрубберах с хордовыми насадками, близкими по конструкции к насадке из хорд размером 13 × 100 *мм*, уложенных так, что хорды каждого ряда образуют прямой угол с хордами предыдущего нижнего ряда и располагаются в шахматном порядке по отношению к хордам второго ряда при расстоянии между хордами в 25 *мм* и плотности орошения в 2,5—6 *л/мин* на 1 *пог. м* вертикальной ребристой поверхности.

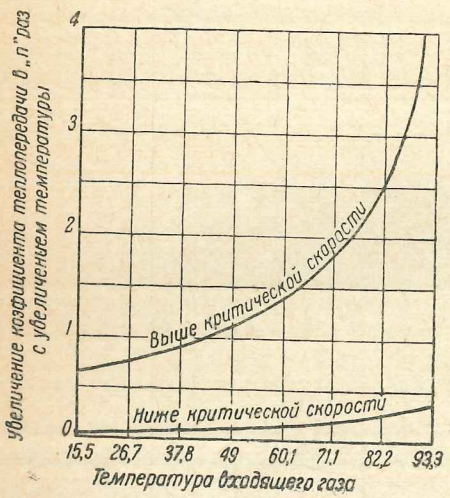


Рис. 180. Увеличение коэфициента теплопередачи (относительно критических скоростей) в зависимости от температуры входящего газа

Произведенные Пейсаховым и Сосновским [186] расчеты скрубберов с хордовой насадкой для количеств газа от 140 000 до 80 000 *м³/сутки* при влагосодержании от 80 до 400 *г/м³*, температуре входящего газа от 600 до 85°, перепаде температур воды от 20 до 40°, средней скорости газа от 0,7 до 2 *м/сек* и постоянной температуре выходящего газа в 25° — указывают на следующее: при уменьшении количества орошения возрастают объем и высота насадки; с увеличением количества газа при неизменных температуре и скорости и различных влагосодержаниях возрастают объем и высота насадки; с уменьшением скорости газа до достижения критической скорости объем насадки увеличивается медленно, высота насадки остается почти постоянной; по достижении критической скорости объем и высота насадки увеличиваются резко; при большом влагосодержании и низких температурах газа объем и высота насадки быстро возрастают; при малом влагосодержании и высоких температурах газа с повышением температуры, так же как и при средних температуре и влагосодержании, объем и высота насадки мало изменяются.

Ниже приведен пример расчета скруббера с хордовой насадкой из досок на ребро размером 2,5 ×10 *см* и с промежутками в 2,5 *см*.

Пример. Часовое количество сухого газа — 2170 *м³/час*. Влаги на 1 *м³* сухого газа — 0,37 *кг*. Температура газа 140°, газ охлаждается до 35°. Начальная температура охлаждающей воды 15°, конечная 40°. Диаметр скруббера — 1,7 *м*.

Часовое количество влаги в сыром газе:

$$2170 \cdot 0{,}37 = 803 \text{ кг}.$$

Теплосодержание сырого газа при теплоемкости сухой части, равной 0,32:

$$0{,}32 \cdot 2170 \cdot 140 + 803\,(594{,}7 + 0{,}477 \cdot 140) = 97\,200 + 530\,000 = 627\,200 \text{ кал}.$$

Часовое количество влаги в осушенном газе (табл. 82):

$$2170 \cdot 0{,}0473 = 103 \text{ кг}.$$

Теплосодержание осушенного газа при теплоемкости сухой части газа, равной 0,31:

$$0{,}31 \cdot 2170 \cdot 35 + 612 \cdot 103 = 23\,500 + 63\,000 = 86\,500 \text{ кал}.$$

Тепло, отданное в скруббере:

$$627\,200 - 86\,500 = 540\,700 \text{ кал}.$$

Теплом, потерянным скруббером в окружающую среду и уносимым конденсатом, пренебрегаем.

Количество охлаждающей воды:

$$\frac{540\,700}{40 - 15} = 21\,600 \text{ кг/час}.$$

Принимая, что в нижней части скруббера происходит испарение воды без повышения ее температуры, определим температуру газа к концу первой стадии из равенства:

$$(vc + g_1c_1)\,(t_1 - t_x) = g_2\,[r + c_2(t_x - t_w)],$$

откуда

$$t_x = 71° \text{ и } g_2 = 9{,}4 \text{ кг}.$$

Поверхность 1 *м³* насадки приближенно равна:

$$\frac{(0{,}5 \cdot 0{,}025 + 0{,}1) \cdot 2 \cdot 1}{2 \cdot 0{,}025 \cdot 0{,}1 \cdot 1} = 45 \text{ м}^2.$$

Количество тепла, отдаваемого газом в первой стадии:

$$(0{,}32 \cdot 2170 + 0{,}465 \cdot 803)\,(140 - 71) = 75\,000 \text{ кал}.$$

Средняя температура газа в первой стадии:

$$\frac{140 - 71}{2{,}3 \lg \frac{140}{71}} = 101°.$$

Средний объем газа в первой стадии:

$$\frac{\left(2170+\frac{803+812{,}4}{2\cdot 0{,}804}\right)(273+101)}{273}=4350\ м^3.$$

На 1 $м^2$ свободного сечения скруббера приходится:

$$\frac{4350\cdot 4\cdot 2}{3{,}14\cdot 1{,}7\cdot 1{,}7}=3830\ м^3.$$

Имеем для процесса в первой стадии охлаждения (см. выше):

$$K_1=0{,}08\cdot 3830=307\ кал/м^3\ час.$$

Средняя разность температур между газом и водой при противотоке:

$$\frac{(140-40)-(71-40)}{2{,}3\lg\frac{140-40}{71-40}}=58°.$$

Объем скруббера, потребный для первой стадии охлаждения:

$$\frac{75\,000}{58\cdot 307}=4{,}2\ м^3.$$

Количество тепла, отдаваемого газом во второй стадии, соответствует всему количеству тепла — 540 700 *кал*.

Часовой объем газа при температуре выхода газа:

$$\frac{\left(2170+\frac{103}{0{,}804}\right)(273+35)}{273}=2590\ м^3.$$

Действительная скорость газа при выходе из скруббера:

$$\frac{2590\cdot 4\cdot 2}{3600\cdot 1{,}7\cdot 1{,}7\cdot 3{,}14}=0{,}64\ м/сек.$$

Согласно диаграмме (рис. 178), для рассматриваемого случая критическая скорость газа при расстоянии между досками в 1″ равна 0,54 *м/сек*. При скорости в 0,54 *м/сек*, согласно диаграмме рис. 179, коэфициент теплопередачи от насыщенного водяными парами газа к воде равен 38 *кал/м² час* °С.

Превышение скорости газа сравнительно с критической отразится на теплопередаче коэфициентом:

$$0{,}64:0{,}54=1{,}19,$$

а с поправкой, согласно диаграмме рис. 179, в виде коэфициента 1,8, учитывающего температуру входа газа, коэфициент теплопередачи составит:

$$K=1{,}19\cdot 38\cdot 1{,}8=81\ кал/м^2\ час\ °С.$$

Количество орошения при длине орошаемых ребер в сечении скруббера, равной:

$$\frac{3{,}14\cdot 1{,}7^2\cdot 2}{4\cdot 2\cdot 0{,}025}=91\ м,$$

составляет:

$$\frac{21\,600}{91\cdot 60}=4{,}0\ л/пог.\ м\ мин.$$

Влияние количества орошения на коэфициент теплопередачи незначительно, так как оно несколько превышает оптимальное (2 *л/м мин*; см. выше).

Ввиду того что в основном передаваемое тепло состоит из тепла конденсации влаги, не пропорционального изменению температур, среднюю температуру газа определяем по его среднему теплосодержанию. Теплосодержание 1 $м^3$ сухого газа и насыщающей его влаги при 71° составляет 265 *кал* и при 35 ° — 40 *кал*. Среднее теплосодержание составляет 119 $кал/м^3$, что соответствует газу, насыщенному водяным паром при температуре 55°. Средняя температура воды 26°. Разность средних температур газа и воды:

$$55-26=29°.$$

Объем скруббера, необходимый для охлаждения газа во второй стадии:

$$\frac{540\,700}{45\cdot 29\cdot 81}=5{,}1\ м^3.$$

Полезный объем скруббера:

$$4{,}2+5{,}1=9{,}3\ м^3,$$

что при выбранном диаметре в 1,7 *м* дает следующую рабочую высоту насадки:

$$\frac{9{,}3\cdot 4}{3{,}14\cdot 1{,}7^2}=4{,}2\ м.$$

Скрубберы с пульверизаторами-форсунками

Скрубберы без заполнения все более и более внедряются в газогенераторных установках, что связано с простотой их оборудования и чрезвычайно малым сопротивлением прохождению газов. При достаточно тонком распылении поверхность соприкосновения газов и воды достаточно велика. Преимущественное применение эти скрубберы могут иметь в тех случаях, когда не предъявляется особых требований к очистке газа от пыли, так как отсутствие шероховатых поверхностей насадки должно препятствовать удалению мелкой пыли. С задачей охлаждения газа скрубберы без заполнения справляются хорошо, и они устанавливаются как для частичного предварительного охлаждения газа до смолоотделительных приспособлений, так и для окончательного охлаждения газа.

Помимо худшей очистки газа от пыли скрубберы без заполнения имеют недостаток, заключающийся в необходимости подачи воды к форсункам под значительным давлением.

Степень распыления воды ограничивается, с одной стороны, расходом энергии на процесс распыления, а с другой — уносом мелких капель воды с газом. Скорость газа ограничивается уносом капель, сопротивлением скруббера и требуемой степенью очистки газа.

В скрубберах необходимо бороться с укрупнением капель влаги, что достигается путем снабжения скрубера распылителями в нескольких местах по высоте скруббера, причем расположенными в нижней части скруббера распылителями направляют струю снизу вверх. Иногда струи направляют горизонтально.

Падающая сверху капля воды набирает скорость до тех пор, пока сопротивление, оказываемое газовой средой, не будет равно ее весу, после чего капля продолжает падать с постоянной относительной скоростью, определяемой по формуле [185]:

$$v = \sqrt{\frac{2gG}{\varphi\gamma F}},$$

где v — относительная скорость капли в *м/сек*,
G — вес капли в *кг*,
g — 9,81 *м/сек*^{2},
γ — вес 1 *м*^{3} газа в *кг*,
F — поперечное сечение капли в *м*^{2},
φ — опытный коэфициент, равный 0,5 для шара.

Подставляя вместо g — 9,81, вместо G — $\frac{\pi d^3}{6} \cdot 1000$, вместо φ — 0,5 и вместо F — $\frac{\pi d^2}{4}$, получим:

$$v = 162\sqrt{\frac{d}{\gamma}}\ м/сек.$$

Когда силы, действующие на каплю, распределены равномерно, она принимает шарообразную форму, в случае же одностороннего действия потока газа, как это имеет место в скрубберах, капля сплющивается и диаметр ее возрастает, что увеличивает давление на каплю. По этой причине взамен принимаемой Гаусбрандом для диаметра капли в пределах 0,25—10 *мм* величины $\varphi = 0{,}3$ нами принято $\varphi = 0{,}5$.

Точных данных для значений коэфициентов теплопередачи от газа к каплям воды нет. По Юргесу [134] коэфициент теплопередачи конвекцией от плоской гладкой поверхности к воздуху, движущемуся со скоростью v, составляет при скорости меньшей 5 *м/сек* — $4{,}8 + 3{,}4\,v$ и при скорости большей 5 *м/сек* — $6{,}12\,v^{0{,}78}$

Коэфициент теплопередачи от газа к воде в первой стадии может быть определен приближенно и по формуле:

$$2 + 10\sqrt{v},$$

где v — относительная скорость падения капли в газе в *м/сек*.

Объем скруббера V_1, необходимый для охлаждения газа до температуры насыщения, определится по формуле:

$$V_1 = \frac{Q}{k\Delta tf},$$

где все обозначения те же, что и раньше, а f представляет собой поверхность в *м*^{2} капель, содержащихся в 1 *м*^{3} скруббера.

Процеес, происходящий во второй стадии, можно рассматривать как процесс диффузии водяного пара через пленку насыщенного газа к поверхности капель. Объем скруббера в этой стадии — V_2 может быть определен по формуле:

$$V_2 = \frac{G}{k_\partial\,\Delta P f},$$

где G — количество водяного пара, сконденсированного во второй фазе в *кг*,
ΔP — средняя разность давлений водяного пара при соответствующих температурах над водой и в газе в *мм* рт. ст.,
κ_∂ — коэфициент диффузии водяного пара в *кг/м*^{2} *час* при разности давлений в 1 *мм* рт. ст.,
f — поверхность, образованная каплями в 1 *м*^{3} скруббера, в *м*^{2}.

Коэфициент диффузии может быть определен по Глинчлею и Карриеру, дающим для движущегося воздуха следующее выражение:

$$k_\partial = 0{,}055\left(1 + v\frac{60}{69}\right)\ кг/м^2\ час\ мм\ рт.\ ст.\ [186].$$

Ниже приведен пример расчета высоты скруббера, снабженного пульверизаторами-увлажнителями для тех же данных, что и в предыдущем примере.

Пример. Средняя температура газа в первой стадии — 101°; конечное влагосодержание — 812,4 *кг/час*; средний объем влажного газа — 1,2 *м*^{3}/*сек* (101°, 760 *мм*); средняя скорость газа — 0,53 *м/сек*; объемный вес газа при 101° — 0,8 *кг/м*^{3}; количество орошающей воды — 6 *л/сек*; плотность орошения — 2,64 *л/м*^{2} *сек*; диаметр капли — 1 *мм*.

Относительная скорость падения капли:

$$v = 162\sqrt{\frac{0{,}001}{0{,}8}} = 5{,}7\ м/сек.$$

Действительная скорость падения капли:

$$5{,}7 - 0{,}53 = 5{,}17\ м/сек.$$

Время падения капли с высоты 1 *м*:

$$1 : 5{,}17 = 0{,}194\ сек.$$

Число капель в 1 *л* воды:

$$\frac{10^{-3} \cdot 6}{3{,}14 \cdot 1 \cdot 10^{-9}} = 1{,}91 \cdot 10^6.$$

Поверхность капель, полученных из 1 *л* воды:

$$3{,}14 \cdot 10^{-6} \cdot 1{,}91 \cdot 10^{6} = 6\ м^2.$$

Поверхность капель в 1 $м^3$ объема скруббера:

$$6 \cdot 2{,}64 \cdot 0{,}194 = 3{,}1\ м^2.$$

Коэфициент теплопередачи в первой стадии:

$$2 + 10\sqrt{5{,}7} = 26\ кал/м^2\ час\ °C.$$

Средняя разность температур газа и воды — 58°.

Количество тепла, отдаваемого сырым газом в первой стадии:

$$(0{,}32 \cdot 2170 + 0{,}465 \cdot 803)(140 - 71) = 75\,000\ кал.$$

Объем части скруббера, необходимый для первой стадии процесса:

$$V_1 = \frac{75\,000}{26 \cdot 58 \cdot 3{,}1} = 16\ м^3.$$

Температурам насыщенного водяного пара соответствуют, согласно табл. 80, давления:

71° — 243,9 *мм*
35° — 42,2 »
15° — 12,8 »
40° — 55,3 »

Средняя разность упругостей водяного пара во второй стадии:

$$\Delta P = \frac{(243{,}9 - 55{,}3) - (42{,}2 - 12{,}8)}{2{,}3 \lg \frac{243{,}9 - 55{,}3}{42{,}2 - 12{,}8}} = 85\ мм\ рт.\ ст.$$

Среднее теплосодержание газа во второй стадии соответствует температуре газа, равной 55°, и весу его, равному 0,9 $кг/м^3$.

Относительная скорость падения капли:

$$v = 162\sqrt{\frac{0{,}001}{0{,}9}} = 5{,}4\ м/сек.$$

Действительная скорость падения капли:

$$5{,}4 - 0{,}53 = 4{,}87\ м/сек.$$

Время падения капли с высоты 1 *м*:

$$1 : 4{,}87 = 0{,}205\ сек.$$

Поверхность капель в 1 $м^3$ скруббера во второй стадии:

$$6 \cdot 2{,}64 \cdot 0{,}205 = [illegible]\ м^2.$$

Коэфициент диффузии равен:

$$0{,}055\left(1 + 5{,}4\,\frac{60}{69}\right) = 0{,}314\ кг/м^2\ час\ мм\ рт.\ ст.$$

Необходимый объем скруббера во второй стадии:

$$V_2 = \frac{812{,}4 - 103}{0{,}314 \cdot 85 \cdot 3{,}25} = 8{,}2\ м^3.$$

Полный потребный объем скруббера:

$$8{,}2 + 16 = 24{,}2\ м^2.$$

При диаметре в 1,7 *м* скруббер должен иметь рабочую высоту:

$$\frac{24{,}2 \cdot 4}{3{,}14 \cdot 1{,}7 \cdot 1{,}7} = 11\ м.$$

Расчеты скрубберов с распылителями, произведенные Пейсаховым и Сосновским ([186]) для количества газа 80 000 — 140 000 $м^3/сутки$ при начальных влагосодержаниях от 80 до 400 $г/м^3$, температуре от 600 до 80°, перепаде температур воды от 20 до 40°, средней скорости газа от 0,5 до 1,5 *м/сек*, диаметре капли от 0,25 до 1 *мм* и постоянной температуре выходящего газа, равной 25°, указали на следующее. С увеличением количества газа объем, высота и диаметр скруббера увеличиваются; при увеличении температуры входящего газа при малом его влагосодержании объем и высота скруббера почти не изменяются; при большом влагосодержании, близком к насыщению, объем скруббера с увеличением температуры быстро увеличивается до некоторой температуры, оставаясь в дальнейшем почти неизменным; с уменьшением скорости газа объем, высота и сечение скруббера резко увеличиваются, что объясняется уменьшением плотности орошения, а следовательно уменьшением и поверхности капель в 1 $м^3$ скруббера; с увеличением орошения резко уменьшаются объем и высота скруббера, что объясняется увеличением поверхности капель в 1 $м^3$ скруббера; с уменьшением размера капель размер скруббера сильно уменьшается

Каскадные скрубберы

К числу скрубберов со смешением газа и воды относятся также каскадные скрубберы с перегородками (рис. 129, 181). В них газ проходит последовательно несколько отделений, меняя свое направление и промываясь водой, стекающей с одной перегородки на другую.

На рис. 181 представлен скруббер Лимна. Он состоит из цилиндрического железного кожуха. Внутри холодильника к расположенному по оси стержню прикреплены конуса и к кожуху — конические кольца. Стекая с конуса и колец, вода образует ряд водяных завес, через которые проходит газ, многократно меняя свое направление.

В случае, если скруббер предназначен для установки водяного газа (рис. 181), он снабжается в нижней части изогнутой трубой, погруженной в воду и образующей водяной затвор (барботер), пропускающий газ только в период парового дутья.

Представленный на рис. 129 скруббер работает аналогично и также комбинируется с гидравлическим затвором (см. гл. III).

В случае, если скруббер выполнен в виде аппарата каскадного типа (Лимн, тарельчатый скруббер), для определения объема его при насыщенном влагой газе можно воспользоваться [136] выражением для объемного коэфициента диффузии, под которым понимается количество водяного пара, диффундирующего к поверхности воды в 1 $м^3$ скруббера за час при разности давлений в 1 *мм* рт. ст. Значения указанного коэфициента могут быть определены по данным Робинзона для охладительных башен типа Уиллера, Бальке, Бэджера и др.

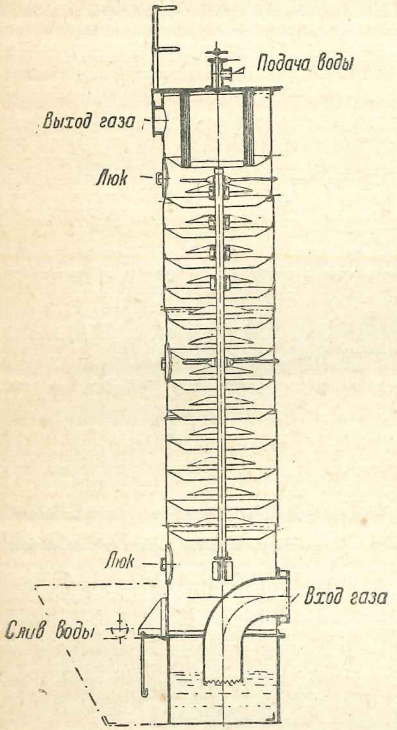


Рис. 181. Холодильник Лимна

Согласно данным Робинзона, коэфициент диффузии прямо пропорционален скорости газа, и среднее значение его при скорости газа в 1 *м/сек* и средней температуре газа 27° равно 0,7 *кг* воды на 1 $м^3$/*час мм* рт. ст. для башенного охладителя типа Бальке и при температуре 32° — 0,91 *кг*/$м^3$ *час мм* рт. ст. для охладителя типа Бэджера. Чтобы определить объем скруббера, требуемый для процесса охлаждения газа в первой стадии, необходимо знать поверхность, образуемую водой. Ориентировочно она может быть определена из сопоставления объемного и поверхностного коэфициентов диффузии, а именно:

$$K_\partial^t = 0{,}055\left(1 + \frac{60\,v}{69}\right) F,$$

где F — поверхность, образованная каплями в 1 $м^3$ скруббера, в $м^2$,
v — относительная скорость газа и воды в *м/сек*,
K_∂^t — объемный коэфициент диффузии в *кг* воды на 1 $м^3$/*час мм* рт. ст.

Для тех же условий, что и в предыдущем примере со скруббером с распылителями, принимаем поправку, что скорость газа, так же как и воды, движущегося последовательными поворотами, будет равна 1 *м/сек*.

При указанных скоростях и средней температуре газа в 32° Робинзоном было получено значение для K_∂, равное 0,91 *кг*/$м^3$ *час мм* рт. ст. [186].

Для других температур (не 32°) значение коэфициента диффузии может быть определено из выражения:

$$K_\partial^t = K_\partial \left(\frac{T_2}{T_1}\right) \text{ кг воды на } 1\ м^3/\text{час мм рт. ст.},$$

где T_1 и T_2 — абсолютные температуры газа, соответствующие значениям K_∂ и K_∂^t.

Пример (см. условия предыдущих задач).

Учитывая, что в нашем случае во второй стадии средняя температура газа равна 55°, получим:

$$K_\partial^t = 0{,}91\,\frac{(273+55)}{(273+32)} = 1\ кг/м^3\,час.мм\,рт.\ ст.$$

$$F = \frac{1}{0{,}055\left(1+\frac{60\cdot 2}{69}\right)} = 6{,}6\ м^2.$$

Объем скруббера Лимна, необходимый для первой стадии охлаждения, равен:

$$V_1 = \frac{75\,000}{(2+10\sqrt{2})\cdot 58\cdot 6{,}6} = 12{,}2\ м^3.$$

Объем скруббера для второй стадии охлаждения определится из выражения:

$$V_2 = \frac{G}{K_\partial^t \Delta P},$$

где G — количество влаги, которая должна быть сконденсирована, в *кг*,
K_∂^t — коэфициент диффузии в *кг*/$м^3$ *час мм* рт. ст.,
ΔP — средняя разность давлений водяного пара над водой и в газе в *мм* рт. ст.

Объем скруббера Лимна, необходимый для второй стадии охлаждения:

$$V_2 = \frac{812{,}4 - 103}{1\cdot 85} = 8{,}3\ м^3.$$

Общий активный объем:

$$8{,}3 + 12{,}2 = 20{,}5\ м^3.$$

С увеличением скорости газа объем скруббера Лимна сильно уменьшается, что объясняется тем, что коэфициент диффузии растет со скоростью.

Другие конструкции скрубберов

Для увеличения интенсивности работы холодильников предложен ряд специальных конструкций. На рис. 182 представлен промыватель Фельда [176], состоящий из нескольких промывательных камер, расположенных по вертикали и разделенных горизонтальными перегородками с отверстиями, через которые проходит газ. Вертикальный вращающийся вал, проходящий через весь холодильник, снабжен в каждой камере корзинками, разбрызгивающими благодаря центробежной силе воду, орошающую идущий навстречу газ.

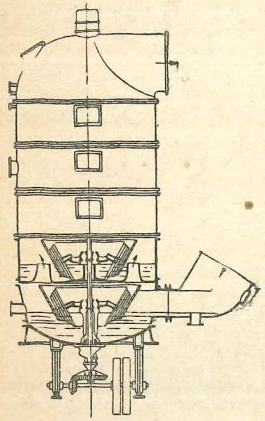


Рис. 182. Промыватель Фельда

Чем быстрее вращается вал в скруббере Фельда, тем лучше очищается газ от пыли. При 120 *об/мин*, в доменном газе с содержанием пыли от 7 до 4,5 *г/м*³ остается пыли 0,1—0,18 *г/м*³. Сопротивление скруббера мало.

Скруббер Дюквезена и Штейнбарта снабжен перегородками в виде двойных сеток, находящихся на расстоянии 2,5 *м* друг от друга. Распылители расположены под нижней и верхней сетками и направлены вверх. Впуск воды каждые две секунды включается и выключается. Вода хорошо распределяется по сечению скруббера, и газ хорошо промывается.

Имеются также охладители газа в виде горизонтальных камер, в которых установлены распыливающие воду сопла и перегородки, меняющие направление движения газа.

Охлаждение и очистка газа могут быть также достигнуты с помощью инжектора, хорошо смешивающего воду с газом и в то же время являющегося побудителем для движения газа.

Сухие скрубберы

После промывки водой газ механически увлекает некоторое количество влаги, которая может или осесть в газопроводе, или быть унесенной с газом в место его использования. Для удаления этой влаги ставят сухие очистители—камеры, наполненные каким-либо материалом, вызывающим большое число изменений направления и скорости газа; взвешенная влага при этом выпадает. Эти сухие очистители заполняются кольцами Рашига, стружками, коксом. Помимо влаги в сухих очистителях задерживаются и уносимые газом частицы пыли, смолы и масел.

Сопротивление скрубберов

Для подсчета сопротивления скрубберов с насадкой может быть использована формула, приведенная в главе III для расчета сопротивления от трения по пути газа, а именно:

$$\Delta P = \lambda \frac{w^2 \gamma L}{2g\, d},$$

откуда для ламинарного потока:

$$\Delta P = 32\, w\, \eta \frac{L}{d^2}$$

и для турбулентного при гладких поверхностях:

$$\Delta P = \frac{0{,}1582 \cdot w^{1{,}75} \cdot \gamma^{0{,}75} \cdot \eta^{0{,}25} \cdot L}{d^{1{,}25} \cdot g^{0{,}75}}.$$

При шероховатых поверхностях насадки показатель степени скорости может возрасти до 2, λ — значительно увеличиться и даже стать независимой от Re.

По некоторым исследованиям величина $\frac{\lambda}{d}$ составляет (считая на скорость воздуха, отнесенную к полному сечению орошаемой насадки) для:

кокса	размером	75 *мм*	— 170
»	»	25 »	— 800
колец Рашига	размером	25 »	— 800
»	» »	11 »	— 1000
кварца	размером	50 »	— 800

Исследования [189] влияния различных факторов на сопротивление насадок из фарфоровых колец Рашига размером 8×8, 15×15 и 25×25 *мм* и седлообразных тел Берля размером 10×10, 15×15 и 25×25 *мм* указывают на следующее.

Особенно большое значение для потерь давления имеет скорость газа. При отсутствии орошения потери давления для одной и той же насадки на 1 *м* высоты в зависимости от скорости выражаются уравнением:

$$\Delta P = K_c\ w^a\ *,$$

где K_c — коэфициент сопротивления для сухой насадки,
w — скорость, отнесенная к незаполненному сечению.

Полученные данные свидетельствуют об увеличении сопротивления при одной и той же скорости с уменьшением размеров элементов, а также о ламинарном характере движения части потока, увеличивающейся с уменьшением размеров элементов, а следовательно и каналов.

Согласно опытам, величина ΔP изменяется пропорционально $\gamma^{0{,}83}$, а влияние вязкости — незначительно: при самых вязких газах изменение сопротивления не превышало 15% по отношению к воздуху.

Исследования показывают, что зависимость потерь давления в насадке от скорости, размера элементов и объемного веса для сухих фарфоровых колец Рашига исследованных размеров следующая:

$$\Delta P = 0{,}27\, L \frac{w^{1{,}85} \gamma^{0{,}83}}{d^{1{,}27}}$$

---

* a колеблется в пределах 1,82—1,88.

и для фарфоровых насадок Берля (седлообразных):

$$\Delta P = 0{,}13\, L \frac{w^{1{,}82}\,\gamma^{0{,}83}}{d^{1{,}4}}.$$

При орошении насадок водой условия значительно осложняются и приобретают значение плотность орошения насадки, проходимость по краям, отношение диаметра элемента к диаметру скруббера и равномерность распределения жидкости. С увеличением плотности орошения сопротивление растет, причем с повышением равномерности распределения воды повышается прирост сопротивления; с приближением к максимальному приращению жидкость собирается в струи и, начиная с этой точки, ΔP возрастает прямолинейно, и приращение сопротивления становится постоянным и одинаковым как для случая с центральным подводом жидкости, так и с подводом ее распределительным приспособлением.

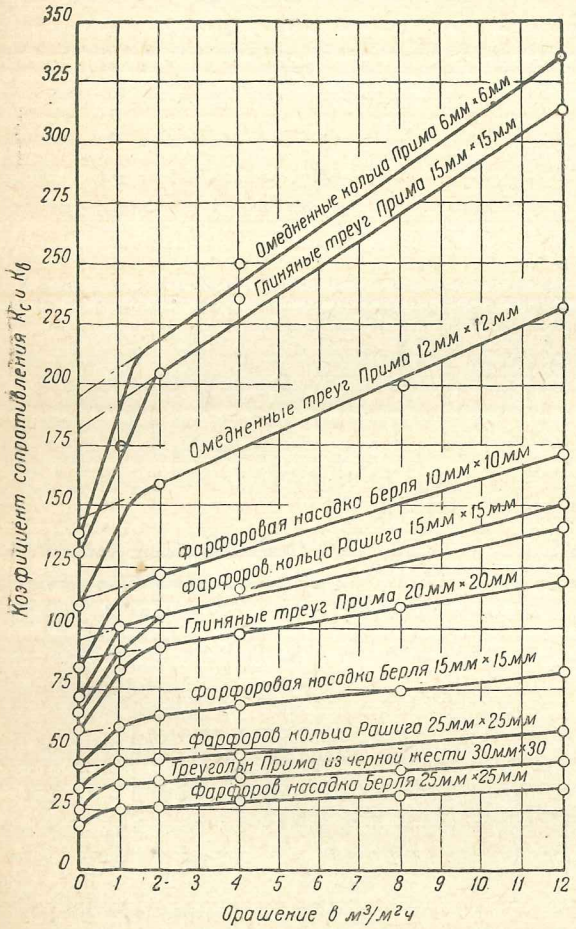


Рис. 183. Зависимость коэфициентов сопротивления от вида насадки и плотности орошения K_c — для сухой насадки и $K_в$ —для орошаемой

Наибольшие значения для сопротивления имеет скорость газа, в зависимости от которой возможно было для колонны диаметром в 300 *мм* и насадки высотой в 1 *м* установить три области скоростей.

Верхняя область приводит к механическому уносу влаги, и ее следует избегать. При средней скорости наблюдается бурление, не способствующее увеличению теплообмена. В большинстве случаев оптимальная скорость лежит в нижней области или несколько выше. Нижняя область соответствует потерям давления в 50—70 *мм* вод. ст., а верхняя — в 200—350 *мм* вод. ст. на 1 *м* высоты насадки.

В табл. 84 и на рис. 183 приведены коэфициенты сопротивлений из выражения $\Delta P = K_в\, w^n$ для главной (нижней) области скоростей в зависимости от плотности орошения при скорости воздуха в 1 *м/сек*. Они показывают, что потери давления в насадке возрастают, начиная с определенной минимальной плотности орошения, прямолинейно. Приращение сопротивления с увеличением плотности орошения не является одинаковой частью потерь давления в сухой насадке, но относительно возрастает с потерями давления в сухой насадке.

Прямые рис. 183 могут быть выражены при помощи уравнений вида:

$$K_в = K_{см} + bB,$$

где B — плотность орошения,
$K_в$ — коэфициент сопротивления для орошаемой насадки,
$K_{см}$ — коэфициент сопротивления смоченной насадки, равный $1{,}4\,K_c$,
b — прирост коэфициента сопротивления при увеличении плотности орошения на единицу, могущий быть определенным графически в зависимости от $K_{см}$; $b = 0{,}005\, K_{см}^{1.5}$.

В выражении:

$$\Delta P = K_в\, L w^n$$

показатель степени n зависит от K_c:

При $n=1{,}95$ . . . . . $K_c=50$
» $n=1{,}9$ . . . . . $K_c=50-100$
» $n=1{,}85$ . . . . . $K_c=100-150$
» $n=1{,}8$ . . . . . $K_c=150-200$

Сопротивление скрубберов без заполнения ничтожно — 3—5 *мм* вод. ст.

Практические данные о размерах скрубберов и расходе воды

Объем скруббера для охлаждения и очистки бессмольного газа принимается равным примерно 0,7—1% от часового объема газа (0°, 760 *мм*), что соответствует 25—35-секундному времени пребывания газа в скруббере, считая на полный объем скруббера и нормальный объем газа. Если скруббер предназначается для охлаждения и очистки смолистого газа без предварительного смолоулавливания или очень пыльного газа, время пребывания газа в нем доводится до 45 сек. В случае предназначения скруббера лишь для частичного охлаждения газа, как например в случае предварительного охлаждения его перед смолоулавливающими аппаратами, время пребывания газа в скруббере может быть принято равным от 2 до 5 сек.

Скорость газов в скруббере обычно составляет примерно 0,5—0,75 *м/сек*.

Размеры скрубберов некоторых существующих в СССР газогенераторных установок приведены в табл. 85, а в табл. 81, 82 приведены данные о скрубберах коксовой промышленности. По работе скрубберов типа Лимна имеются следующие данные: диаметр скруббера —

Таблица

Уравнения для расчета потерь давления $\Delta P = K_в w^n$ на 1 *м* высоты орошаемой насадки в зависимости от скорости газа w в нижней области скоростей при прохождении воздуха и воды

Тип насадки	Размер (в *мм*)	Материал	Плотность орошения (в $м^3/м^2$ *час*)				
			1	2	4	8	12
Кольца Рашига	8×8	Фарфор	$222 \cdot w^{1,83}$	$250 \cdot w^{1,86}$	$286 \cdot w^{1,87}$	$390 \cdot w^{1,89}$	$471 \cdot w^{1,9}$
» » . . .	15×16	»	$89 \cdot w^{1,89}$	$104 \cdot w^{1,89}$	$114 \cdot w^{1,91}$	$130 \cdot w^{1,92}$	$150 \cdot w^{1,94}$
» »	25×25	»	$42 \cdot w^{1,95}$	$44,2 \cdot w^{1,98}$	$46,5 \cdot w^{2,0}$	$51 \cdot w^{2,03}$	$57 \cdot w^{2,04}$
Седлообразная насадка Берля	10×10	»	$110 \cdot w^{1,83}$	$121 \cdot w^{1,83}$	$129 \cdot w^{1,85}$	$147 \cdot w^{1,87}$	$170 \cdot w^{1,9}$
То же	15×15	»	$57 \cdot w^{1,95}$	$57 \cdot w^{1,85}$	$60,5 \cdot w^{1,86}$	$65 \cdot w^{1,89}$	$80,2 \cdot w^{1,96}$
Кольца «Прима» . . .	4×4	Покрытое медью железо	$390 \cdot w^{1,73}$	$435 \cdot w^{1,73}$	$543 \cdot w^{1,73}$	$797 \cdot w^{1,8}$	$1060 \cdot w^{1,8}$
» »	6×6	То же	$190 \cdot w^{1,73}$	$216 \cdot w^{1,78}$	$248 \cdot w^{1,78}$	$285 \cdot w^{1,78}$	$336 \cdot w^{1,78}$
» »	9×9	Алюминий	$202 \cdot w^{1,73}$	$222 \cdot w^{1,73}$	$245 \cdot w^{1,74}$	$288 \cdot w^{1,74}$	$340 \cdot w^{1,75}$
Треугольники «Прима»	12×12	Покрытое медью железо	$142 \cdot w^{1,82}$	$159 \cdot w^{1,89}$	$173 \cdot w^{1,84}$	$198 \cdot w^{1,84}$	$229 \cdot w^{1,89}$
То же	20×20	То же	$83 \cdot w^{1,83}$	$90 \cdot w^{1,85}$	$96 \cdot w^{1,86}$	$106 \cdot w^{1,89}$	$118 \cdot w^{1,95}$
»	30×30	Черная жесть	$33,5 \cdot w^{1,92}$	$34,6 \cdot w^{1,93}$	$36,4 \cdot w^{1,94}$	$39,4 \cdot w^{1,95}$	$43,3 \cdot w^{1,95}$
»	15×18	Глина	$174 \cdot w^{1,85}$	$205 \cdot w^{1,88}$	$235 \cdot w^{1,88}$	$270 \cdot w^{1,88}$	$360 \cdot w^{1,92}$
»	20×24	»	$100 \cdot w^{1,88}$	$105 \cdot w^{1,88}$	$112 \cdot w^{1,89}$	$124 \cdot w^{1,92}$	$140 \cdot w^{1,95}$

1,68 *м*, высота — 9,2 *м* и объем — 20 $м^3$; скруббер снабжен 12 коническими кольцами и 11 конусами; часовой объем водяного газа — 3200 $м^3$, температура газа перед скруббером 212°, за скруббером 21°, поступающей воды 20° и выходящей воды 50°.

Таблица 85

Размеры скрубберов различных установок

Род установки	Размеры и объем скрубберов
Торфяная генераторная станция. Скруббер обслуживает 8 генераторов производительностью в 55 *т* торфа в сутки каждый. Установлен за смолоотделителем Тейсена.	С частью для насыщения воздуха: высота — 19,7 *м*; диаметр — 4,5 *м*. Объем ступеней для осушки газа — 200 $м^3$ (на 1 генератор—25 $м^3$).
Генераторы на челябинском угле с производительностью в 35 *т*. Скруббер установлен за смолоотделителем Тейсена.	С частью, насыщающей воздух: высота — 19,5 *м*, диаметр — 2,5 *м*. Объем ступеней для охлаждения газа—43 $м^3$.
Генераторы на древесной щепе. Производительность — 300 *т/сутки*. Скрубберы установлены за смолоотделителем Котрелля. В работе — четыре: 2—солевых и 2—промывных и 2—в резерве.	4 рабочих: диаметр — 2,8 *м*, высота—10 *м*. Общий объем—245 $м^3$.
Антрацитовый генератор производительностью в 17 *т/сутки*. Газ из генератора проходит водяной затвор, тарельчатый охладитель, вентилятор — очиститель и скруббер.	Тарельчатый охладитель: высота—4 *м*, диаметр—1,3 *м*, объем—5,3 $м^3$. Скруббер: высота—5 *м*, диаметр—1,71 *м*. Объем—11,5 $м^3$.
Антрацитовый генератор производительностью в 22 *т/сутки*. Газ из генератора проходит мокрый пылеотделитель и скруббер.	Диаметр скруббера — 2,8 *м*, высота—7 *м*. Объем—43 $м^3$.
Коксовый генератор производительностью в 22 *т/сутки*. Газ из генератора проходит испаритель и скруббер.	Диаметр скруббера - 2,9 *м* и высота—8,7 *м*. Объем—57 $м^3$.

При работе скруббера Лимна диаметром в 1 *м* и высотой в 7,8 *м* с 6 кольцами и 5 конусами на смешанном газе из подмосковного угля показатели были следующие: количество сухого газа — 2050 $м^3/час$ (0°, 760 *мм*), влажность входящего газа — 215 $г/м^3$, температура газа при входе 400° и при выходе 50°, температура поступающей воды 2,5° и выходящей 49°.

По другим данным при охлаждении в скруббере Лимна 9900 $м^3/час$ водяного газа с 295 до 13° расход воды, подогревавшейся от 10 до 35,5°, составлял 4,5 $л/м^3$ и при охлаждении в том же скруббере 5100 $м^3/час$ с 307 до 17° расход воды, подогревавшейся с 12 до 48°,

составлял 2,4 *л*/*м*³. Содержание пыли при проходе газа через скруббер уменьшилось с 0,5 до 0,013 *г*/*м*³.

Расход воды на охлаждение и очистку газа составляет для летних условий примерно следующие величины:

1) в случае очистки газа из кокса или антрацита — 4—5 *л* на 1 *м*³ газа, что соответствует 16—25 *л* на 1 *кг* топлива;

2) в случае очистки газа из каменного угля — 8 — 10 *л* на 1 *м*³ газа — 25—30 *л* на 1 *кг* топлива;

3) в случае очистки газа из древесины, торфа и бурого угля — 8—10 *л* на 1 *м*³ газа — 15—25 *л* на 1 *кг* топлива.

4. МОКРАЯ ОЧИСТКА БЕССМОЛЬНОГО ГАЗА

Бессмольный газ, получаемый из антрацита и кокса, подвергают мокрой очистке в тех случаях, когда неизбежна потеря физического тепла газа вследствие охлаждения газа в газопроводах и нежелательно засорение газопроводов, а также в специальных случаях, например при работе газомоторов, когда предъявляются требования тонкой очистки газа (0,02 *г*/*м*³).

Схемы установок

В обычной схеме мокрой очистки газа из антрацита и кокса без использования физического тепла газа за генератором устанавливается скруббер. Газ из генератора в скруббер подается вертикальным или наклонным газопроводом, обычно снабженным гидравлическим затвором и выполняемым в виде предварительного охладителя. В случае газификации коксика или антрацита, не содержащих смол, физическое тепло газа может быть использовано для получения пара или горячей воды в трубчатых котлах. Последние устанавливаются по следующей схеме: газ из генератора проходит сухой пылеуловитель, затем трубчатый котел и из последнего направляется в скруббер. Очищенный и охлажденный газ поступает в общий сборник и отсюда засасывается газовыми вентиляторами, нагнетающими газ к местам потребления. Общих коллекторов до скрубберов (в целях уменьшения количества скрубберов) обычно не применяют во избежание их засорения.

По рис. 184 газ из генератора, работающего на топливе, не содержащем смолы (антрацит, кокс), проходит пылеуловитель и из него попадает в трубчатый котел, в котором подогревается вода, служащая для насыщения первичного воздуха паром, или получается пар, используемый для разных нужд в установке (рис. 185). Несколько охлажденный газ поступает в скруббер, где промывается водой, после чего попадает в газовый вентилятор.

По рис. 186 газ из генератора, работающего на топливе, не дающем смолы, охлаждается и частично очищается от пыли в тарельчатом промывателе, после чего поступает в газовый вентилятор, орошаемый холодной водой. Из вентилятора газ поступает в скруббер, где из него промывкой удаляется оставшаяся пыль.

По другим схемам (рис. 188) газ из антрацита или кокса очищается от пыли в стояке, охлаждаемом снаружи или орошаемом водой, и скруббере и после этого поступает в газовый вентилятор. После газового вентилятора газ обычно дополнительно проходит сухой очиститель — каплеуловитель для очистки от увлеченных капель воды, укрупняющихся при проходе газа через вентилятор.

Схемы установок водяного газа и его очистка от пыли и охлаждение описаны в главе II.

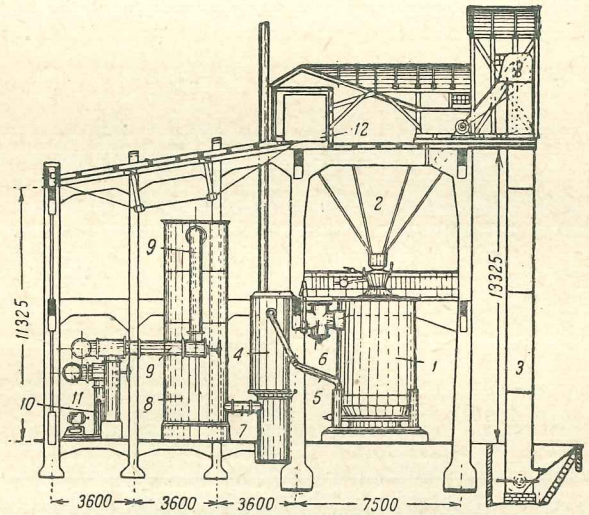


Рис. 184. Схема генераторной станции на коксе или антраците с использованием физического тепла газа:

1—генератор, *2*—бункер, *3*—элеватор, *4*—трубчатый котел-утилизатор, *5*—подвод паровоздушной смеси в генератор, *6*—пылеуловитель, *7* патрубок, соединяющий котел со скруббером, *8*—скруббер, *9*—газопровод к вентилятору, *10*—газовый вентилятор, *11*—газопровод очищенного газа, *12*—бак для воды

Обычно водяной газ из генератора поступает или непосредственно в скруббер или через гидравлический затвор — барботер (гидравлика), предупреждающий возможность обратного прохождения газа. Иногда физическое тепло водяного газа используется для подогрева воды или получения пара.

Газы горячего дутья в случае использования их тепла (в карбюраторах, перегревателях, котлах-утилизаторах) при большом содержании пыли очищают в пылеуловителях, дожигают в специальной камере и после использования выпускают в атмосферу. Иногда на случай выключения использующих тепло приспособлений предусматривают возможность охлаждения и очистки продуктов горячего дутья в скруббере.

При промывке в скрубберах газ очищается до содержания пыли в 0,1—0,5 *г*/*м*³.

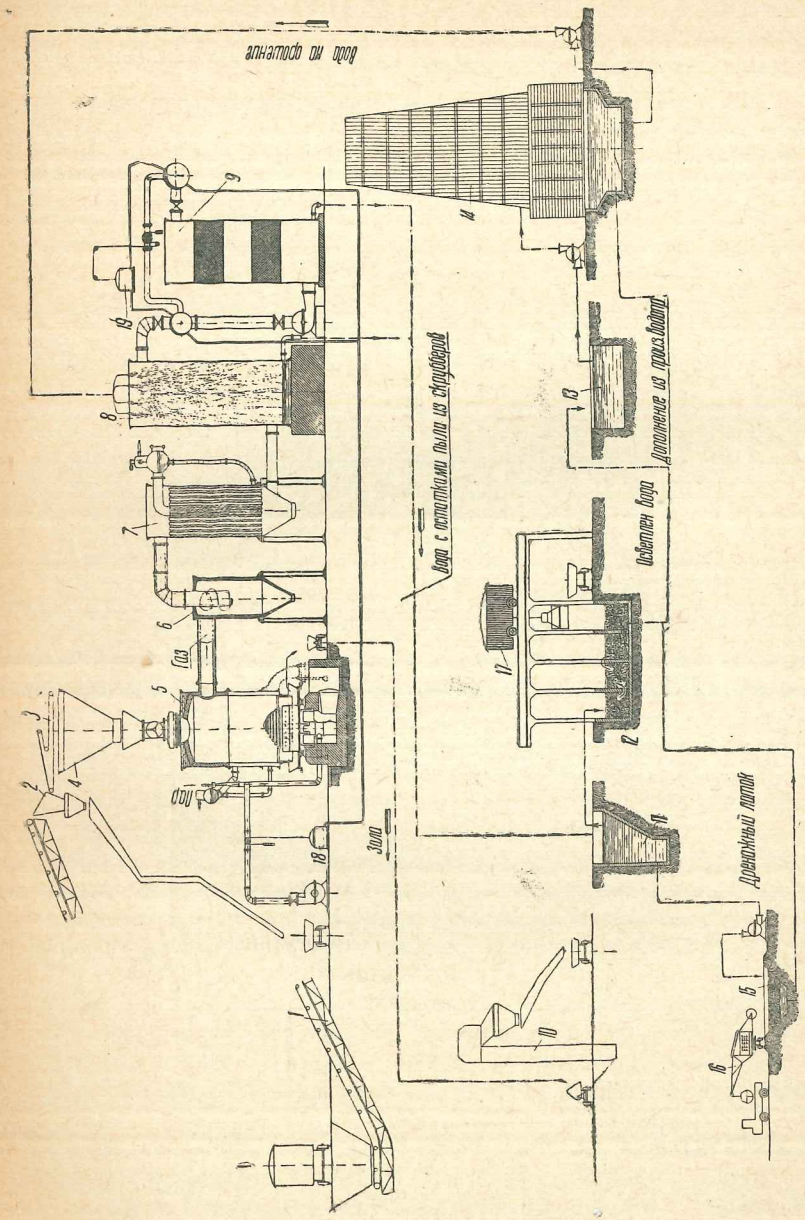


Рис. 185. Схема установки с мокрой очисткой бессмольного газа, использованием физического тепла газа и очисткой промывных вод:

1—ленточный транспортер, подающий топливо к станции, *2*—грохот, *3*—ленточный транспортер над бункерами генераторов, *4*—бункер, *5*- газогенератор, *6*—пылеуловитель, *7*—кстел-утилизатор, *8*—скруббер, *9*—каплеуловитель, *10*—ковшевой элеватор для золы, *11*—пылеотстойная яма, *12*—фильтр, *13*—сборный резервуар горячей воды, *14*—градирня, *15*—шламовая яма, *16* и *17*—краны с грейфером, *18*—регулятор количества воздуха, *19*—регулятор давления газа (на байпасной линии)

Тонкая очистка

Обычно описанная очистка в достаточной мере удовлетворяет требованиям потребителей. В некоторых случаях уноса с газом очень мелкой пыли, не смачиваемой водой и поэтому трудно удаляемой, а также в случае особой чувствительности потребителя к загрязнениям газа (применение газа в газомоторах) предъявляют требования более тонкой очистки газа.

Для случаев очень тонкой очистки газа применяют помимо описанной выше очистки, связанной с охлаждением газа и называемой первой ступенью очистки, также вторую ступень очистки, проводимую при помощи специальных аппаратов.

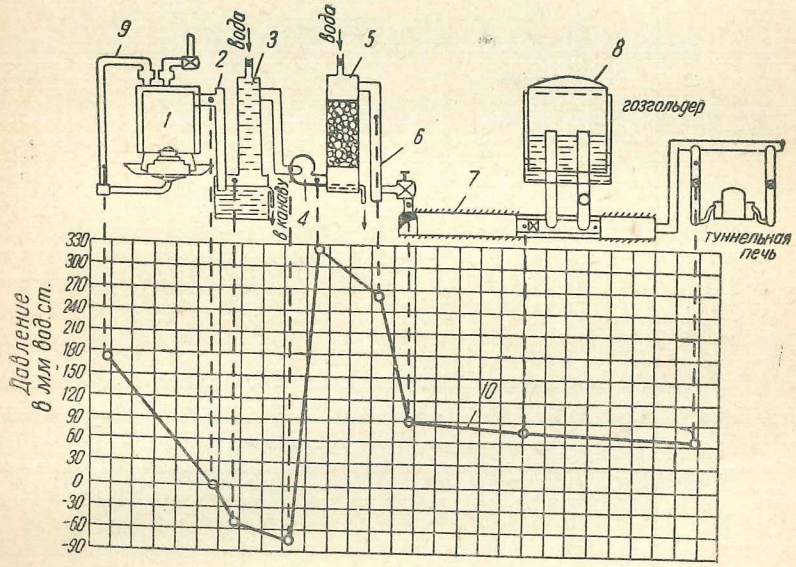


Рис. 186. Схема генераторной станции на антраците:

1—газогенератор, *2*—стояк, *3*—тарельчатый промыватель, *4*—газовый вентилятор, *5*—скруббер, *6*—стояк, *7*—подземный газопровод, *8*—газгольдер, *9*—подвод в генератор воздуха, увлажненного в крышке генератора—испарителе, *10*—кривая распределения давлений в установке

Для тонкой очистки газа от взвешенных частиц (176) (пыли и смолы) наибольшее распространение нашли два типа аппаратов — механические и электростатические (электрофильтры). Эти аппараты описаны ниже, в разделе «Улавливание смолы».

Преимущественное применение из этих аппаратов для очистки газа от пыли имеют дезинтеграторы Тейсена. В последние годы начинают весьма широко применяться в качестве аппаратов для тонкой очистки газа от пыли также электрофильтры, имеющие некоторые преимущества по сравнению с дезинтеграторами Тейсена.

Газ для тонкой очистки от пыли поступает в очиститель Тейсена, предварительно охлажденный до 25—45°. В самом очистителе газ промывается водой.

Таблица 86

Опыты с дезинтегратором Тейсена (размер: 2300—*R*)

Показатели \ Время производ. опыта и продолжительность опыта	20/XI 1922 г.	2/XII 1922 г. 9 ч. 30 м. 11 ч. 30 м.	5/XII 1922 г. 12 ч. 15 м. 2 ч. 15 м.	5/XII 1922 г. 2 ч. 30 м. 4 ч. 30 м.	5/XII 1922 г. 4 ч. 35 м. 6 час.	7/XII 1922 г. 11 час. 12 час.	7/XII 1922 г. 1 ч. 07 м. 1 ч. 55 м.	16/XII 1923 г.
Количество газа, приведенное к 45° С (в *м³/час*)	52 800	44 850	59 800	55 000	55 800	61 500	53 550	52 900
Температура газа при входе в дезинтегратор (в °С)	45	45	43	43	45	43,5	42,5	—
Создаваемое в дезинтеграторе давление (в *мм* вод. ст.)	305	300	283	302	304	281	310	271
Давление в трубопроводе чистого газа (за очистителем) (в *мм* вод. ст.)	295	275	248	232	226	256	259	70,9
Расход воды (в *м³/час*)	72,4	72,2	75,3	60,8	45,4	44,2	43,9	1,34
Расход воды (в *л/м³*)	1,37	1,6	1,26	1,104	0,86	0,72	0,82	—
Температура воды при входе в дезинтегратор (в °С)	—	31	33	33	33	32	33	—
Температура воды при выходе из дезинтегратора (в °С)	—	—	44	44	44	43	43	—
Расход энергии: вольт	5174	5175	5200	5194	5174	5199	5227	—
ампер	45,4	48	50	42	34,6	37,25	35,8	—
cos φ	0,825	0,89	0,89	0,882	0,862	0,87	0,866	—
л. с.	456	521	545	453	362	396	372	—
К. п. д. мотора	0,922	0,9	0,94	0,937	0,932	0,935	0,934	—
Расход энергии (в э. л. с.)	420	470	512	425	338	371	359	504
Содержание пыли в неочищенном газе (в *г/м³*) при входе в дезинтегратор	1,41	—	1,18	1,17	1,15	0,01	0,94	1,12
Чистый газ: температура на месте измерения (в °С)	—	22	22	22	22	22	22	—
влажность (в *г/м³*)	—	17,8	22,6	—	—	—	—	16,3
содержание пыли (в *г/м³*)	0,008	0,007	0,0061	0,017	0,0176	0,0215	0,0168	0,007

Оборудование газоочистительной установки Тейсена просто, надежно, компактно и легко обслуживается.

Расход воды при промывке составляет 1—1,5 *л* на 1 *м³* газа. Производительность одного агрегата доходит до 80 000 *м³/час*. Эти аппараты также являются вентиляторами, повышающими давление газа, проходящего через них.

В табл. 86 приведены данные о работе дезинтегратора Тейсена на доменном газе.

Для очистки доменного газа от пыли применяются также фильтрующие мешки (сухие фильтры). Иногда вбрызгивают воду и в обычного типа вентиляторы, что преследует цель некоторой очистки газа от пыли. Подобная очистка проста, но расход воды и энергии при ней больше, чем в дезинтеграторах Тейсена, а самая очистка хуже. Конструкция вентиляторов при этом должна быть прочнее обычной.

Некоторые данные об очистке газа от пыли с помощью электрофильтров приведены в табл. 88.

Сравнение стоимости тонкой очистки газа, содержащего пыль, с помощью дезинтеграторов, сухих фильтров и электрических (цены в германских марках) приведено в табл. 87 (на 1000 *м³/час*).

Таблица 87

Сравнение стоимости различных видов очистки

Данные	Дезинтегратор	Сухой фильтр	Электрофильтр
Стоимость установки	5200—6150	5000	6000
Потребная общая площадь (в *м²*)	1,3	3,0	1,4—2,8
Расход энергии с учетом создания давления газа в 300 *мм* и подачи воды в холодильник (в *квт-ч*)	5,6—6,1	1,72	2,18—2,4
Стоимость очистки	0,18—0,29	0,18	0,17—0,21

Таким образом дезинтеграторы занимают наименьшую площадь и имеют наибольший расход энергии. Начальная стоимость дезинтеграторов обычно ниже, чем электрофильтров. Эксплоатационные расходы при дезинтеграторах выше, чем при электрофильтрах.

Выделение пыли из промывной воды

Пыль, вымываемая из газа водой, уносится последней. Воду, обычно циркулирующую в системе, подвергают очистке в отстойниках и фильтрах, представляющих собой громоздкие сооружения. Особенно много места занимают эти пылеуловительные сооружения в больших антрацитовых станциях, так как вследствие растрескивания антрацита при нагревании газ уносит из генератора много пыли (до 5% и более от веса топлива).

Отстойные ямы для воды устраивают таким образом, чтобы скорость воды в них была не велика и чтобы оседающие частицы не могли

образовывать мертвых уплотняющихся мешков. Дно отстойных ям выполняют с уклоном, по которому шлам стекает к всасывающей трубе насоса, откачивающего его (рис. 187).

В подобных отстойниках может быть достигнута лишь грубая очистка воды. Для более тонкой очистки вода пропускается через фильтры из кокса или другого материала (рис. 187, 188). Очищенная вода охлаждается на градирне и вновь поступает в скрубберы или в аппараты Тейсена.

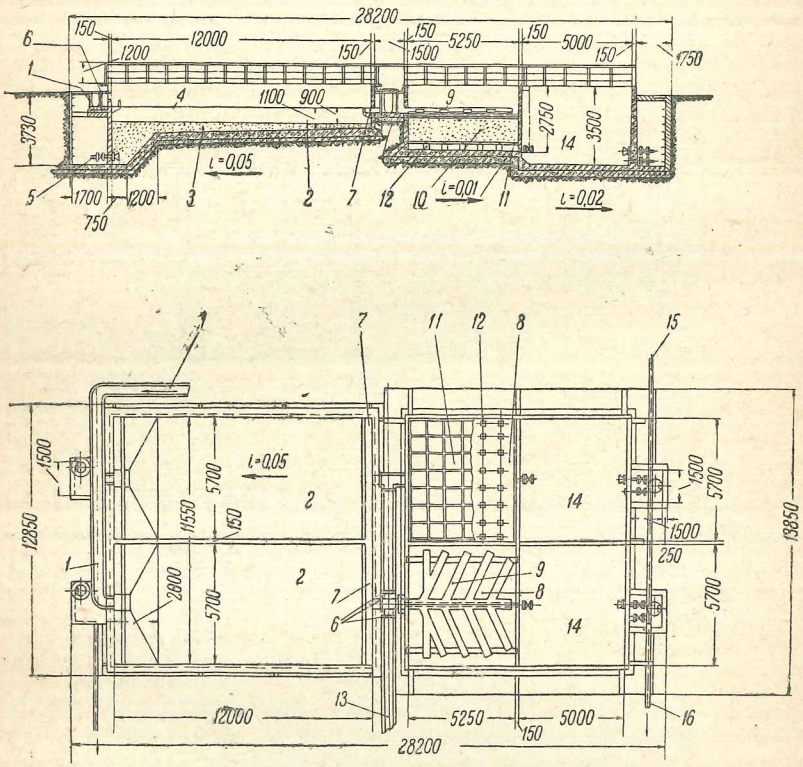


Рис. 187. Резервуар для очистки воды от пыли:

1—подводящий лоток, *2*—отстойные отделения, *3*—слой шлама, *4*—уровень воды, *5*—спуск шлама, *6*—заслонки, *7*—лоток, отводящий воду к фильтрам, *8*—фильтры, *9*—распределительные лотки, *10* слой кокса, *11*—дренажные железобетонные плитки, *12*—опорные столбики, *13*—обводной лоток, *14*—сборные резервуары осветленной воды, *15*—отвод осветленной воды на охлаждение, *16*—спуск в канализацию

В случае, если пыль обладает свойством сильно уплотняться и затвердевать, применяют отстойники, дно которых состоит из канав, имеющих клинообразную форму, в которых оседает шлам. Периодически отдельные канавы перекрывают подъемными бетонными балками и из замкнутого пространства вымывают водой шлам. Этим устройством также избегается неудобство, создаваемое отсасыванием шлама из одной части отстойника. Из отстойников шлам насосом подается на площадки, где он подвергается естественной сушке, после

чего может быть использован например путем сжигания в пылеугольных топках.

Для очистки воды от пыли также применяют отстойные бассейны системы Дорра. Бассейны Дорра имеют круглую форму; вода в них поступает по жолобу в центр бассейна. Дно бассейна заглублено к середине, и в бассейне медленно вращается мешалка, способствующая перемещению оседающих из воды частиц. Очищенная вода отбирается по периферии бассейна кольцевым жолобом и через колодец и насос подается в бассейн горячей воды или на охлаждение. Собирающийся в

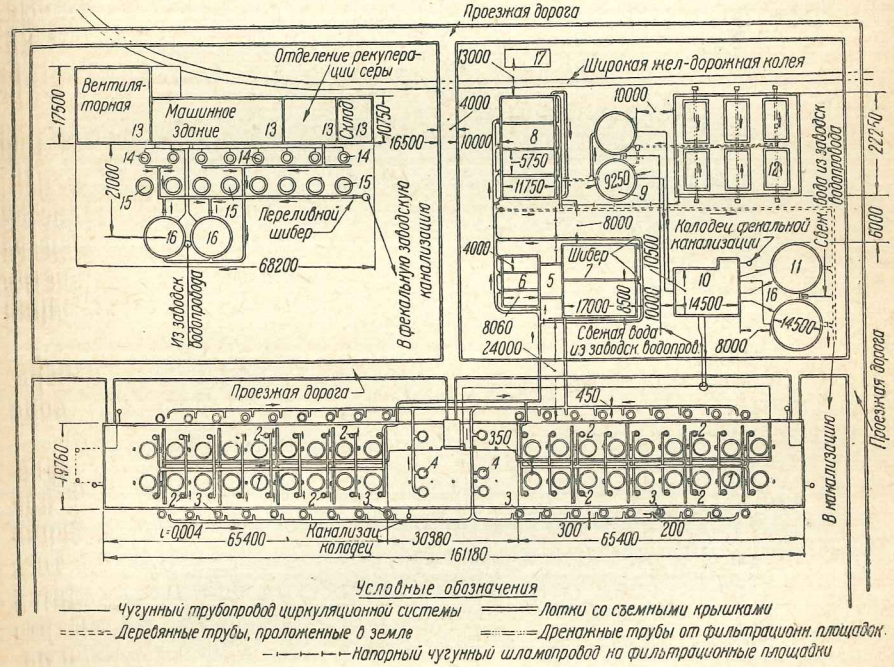


Рис. 188. Схема очистки воды большой антрацитовой станции смешанного газа:

1—газогенераторы, *2*—стояки, *3*—скруббера, *4*—каплеуловители за газовыми вентиляторами, *5*—шламовая насосная станция, *6*—отстойники-пылеуловители для воды от стояков, *7*—отстойные резервуары для воды от скрубберов, *8*—коксовые фильтры, *9*—резервуары для фильтрата, *10*—насосная станция, *11*—градирни, *12*—фильтрационные площадки, *13*—здание мокрой сероочистки, *14*—регенераторы сероочистки, *15*—скруббера сероочистки, *16*—сборные резервуары сероочистки, *17*—склад кокса для фильтров

углубленной части бассейна шлам откачивается насосом в специальные фильтры, в которых он прессуется в брикеты, и направляется на склад. На 1 $м^2$ бассейна может быть очищено 4,5 $м^3$ шлама в сутки. Для перекачки шлама из отстойных бассейнов в фильтры служат поршневые насосы.

На рис. 188 представлена схема очистки воды большой антрацитовой станции смешанного газа.

Вода из стояков и скрубберов поступает в отстойники. Из отстойников вода перетекает к коксовым фильтрам. Последние иногда кон-

струируются таким образом, чтобы вода могла протекать через них как параллельно (на случай чистки отдельных камер), так и последовательно (на случай плохой чистки отдельными камерами). Из фильтров очищенная вода попадает в сборный резервуар и из последнего через насосную — к градирням. Шлам из отстойников подается насосами на фильтрационные площадки для подсушивания. Большие фильтры оборудуются механическими приспособлениями, например тельферами, для разгрузки и загрузки кокса.

Объем пылеотстойных резервуаров для вод газогенераторных станций, работающих на антраците и коксе принимается из расчета 1 — 2-часового отстоя.

5. УЛАВЛИВАНИЕ СМОЛЫ

Смола представляет собой смесь углеводородов и кислородных, азотистых и сернистых соединений с различными температурами кипения — в пределах 70—350°. Легкие масла даже при температуре 30—40° в значительной доле остаются в газе.

Смола может быть уловлена в газогенераторных установках или в целях использования ее как таковой в случае потребности в ней, или же при мокрой очистке газа, когда улавливание смолы является побочной операцией, имеющей целью улучшение и упрощение процесса мокрой очистки. Обычно эти оба случая совпадают. Иногда очистка газа от смолы является результатом соответствующих требований потребителей.

Как указывалось выше, смола, получаемая при низких температурах (генераторы со швельшахтой), является более ценной по своим качествам.

Очищенный от смолы газ дает пламя, не являющееся столь лучеиспускающим и ярким, как пламя газа, содержащего смолу, так как именно частицы углерода, выделяющиеся при сгорании и разложении смол, делают пламя ярким и сильно лучеиспускающим. Кроме того удаление смолы уменьшает количество тепла, которое находится в газе и могло бы поступить к потребителю. При влажном газе это отчасти компенсируется увеличением теплотворной способности и повышением температуры горения газа благодаря его осушке.

Для конденсации смоляных паров газ подвергают охлаждению [192]. Выделить смолу из газа одним охлаждением затруднительно, так как она выделяется в виде чрезвычайно мелких частиц диаметром 0,1—0,001 *мм*, уносимых газом. Эти мельчайшие частицы — туманы смол — представляют собой наполненные газом пузырьки, тем менее способные лопаться и образовывать капли, чем более вязкая смола образует оболочку этих пузырьков. По этой причине нет достаточного соответствия между точками росы отдельных компонентов смолы и выделяемыми и уносимыми при данной температуре газа количествами таковых.

При продолжающемся охлаждении давление газа в пузырьке падает, а вязкость смолы, образующей оболочку пузырька, повышается и следовательно устойчивость тумана увеличивается. Таким образом выделить вязкую смолу одним лишь охлаждением затруднительно.

Скорее это возможно путем вторичного подогрева газа, что однако связано с переходом части смолы в парообразное состояние.

По указанным причинам в поверхностных холодильниках выделяется сравнительно мало смол, и за холодильниками устанавливают дополнительные смолоотделители.

Составные части смолы сжижаются в соответствии с их температурами кипения и парциальными давлениями. Практически невозможно разделить смолу при охлаждении на отдельные фракции и следовательно обойтись без последующей разгонки ее, так как ни в одном из холодильников невозможно создать соответствующие равномерные температурные условия по всей поверхности.

Поверхностные холодильники трубчатого типа для выделения смолы изредка применяют в газогенераторных установках, преимущественно для буроугольного швельгаза. Вязкость буроугольной смолы по сравнению с первичной каменноугольной очень незначительна, и образующийся туман осаждается в холодильнике.

Для выделения смолы из генераторного газа преимущественно применяют аппараты двух типов — механические и электростатические (электрофильтры — аппараты Котрелля).

Из аппаратов первой группы наиболее оправдали себя в генераторных установках дезинтеграторы Тейсена. Эти аппараты являются не только очистительными, но и нагнетающими газ приспособлениями. За аппаратами Тейсена устанавливаются каплеуловители для улавливания остающихся в газе капелек смолы. Аппараты Тейсена дешевы, просты и надежны в работе. Недостатком их является значительное потребление энергии.

В последнее время все бо̀льшее распространение получает электростатический способ очистки газа от смолы. Стоимость оборудования при этом способе бо̀льшая, нежели при механическом. Однако расход электроэнергии даже с учетом установки отдельного нагнетательного газового вентилятора в 2—3 раза ниже, чем при механическом смоловыделении.

Газ поступает в указанные аппараты при температуре на 10—15° выше точки росы, чтобы предотвратить конденсацию влаги и обеспечить максимальную конденсацию смолы и минимальный объем газа.

Улавливание в смолоочистительных аппаратах первичной смолы (из генераторов со швельшахтой) является более легким, чем улавливание смолы, подвергшейся пирогенетическому разложению из обыкновенных генераторов. Это объясняется большей текучестью и отсутствием или меньшим содержанием взвешенных частичек углерода — продукта разложения смолы — в первичной смоле.

Смола, выделяемая в смолоуловительных приспособлениях, даже при температурах выше точки росы не является безводной, так как содержит в растворенном виде некоторое количество влаги.

Помимо описываемых ниже механических и электростатических смолоуловителей для улавливания смолы применяется также промывка газа смолой. Промывка может осуществляться в различного вида скрубберах, преимущественно с распылением подогретой смолы с помощью пульверизаторов-форсунок или с разбрызгиванием ее специальными приспособлениями. В качества скрубберов с разбрыз-

гиванием может служить промыватель Фельда (рис. 182), на вертикальном вращающемся валу которого расположены корзинки с мелкими отверстиями. Смола поступает в самую верхнюю корзинку, которой она при вращении вала мелко распыляется и отбрасывается в горизонтальном направлении к стенке кожуха. Собирающаяся на дне каждого отделения смола переливается в корзину следующего отделения. Из нижнего отделения смола стекает в приемник. Газ поступает через штуцер в нижней части скруббера, проходит через отверстия в горизонтальных перегородках и выходит через штуцер в крышке скруббера. По пути газ многократно подвергается промывке смолой, выделяющей из него смолистые вещества благодаря трению, ударам, образованию центров конденсации и поглощению.

Промывная смола подвергается очистке и подогреву.

В случае мокрой очистки газа путем промывки водой без предварительного применения специальных смолоуловителей смола выделяется вместе с конденсирующейся влагой и смешивается с промывной водой. Подобная очистка несовершенна, некоторая часть смол все же уносится газом, а выделившаяся из газа смола только частично может быть отделена от воды и притом в сильно обводненном состоянии. Кроме того это увеличивает загрязнение воды, которая обычно перед спуском должна быть подвергнута специальной очистке. По указанным причинам подобная очистка может быть применена лишь для малых установок.

Ниже описаны механические и электростатические аппараты для отделения смолы.

Аппараты для отделения смолы механическим путем

1. Принцип работы механических смолоотделителей. Механическое улавливание смолы основывается на использовании сил трения и удара. Использование силы трения возможно например путем пропускания газа через слой жидкости, что однако неэффективно и связано с большим гидравлическим сопротивлением жидкости. Использование поверхностей стен, омываемых газом, дает эффект лишь в первое время работы ввиду заполнения неровностей стенок высококипящими составными частями смолы, сглаживающими стены и уменьшающими трение. При сильном уменьшении сечения для прохода газа такой способ улавливания смолы связан с большой потерей давления, опасностью засорения и уменьшением улавливания взвешенных частиц вследствие возрастания скорости газа. Улавливание смолы путем установки ряда проволочных сеток с мелкими ячейками связано с быстрым засорением их.

Применение пара для очистки поверхностей, засоренных смолой, оказывает удовлетворительное действие лишь в первое время, так как при прогреве удаляется не вся смола, а только наиболее низкокипящие погоны. На поверхностях очистителя постепенно накапливается слой пека, который невозможно удалить с помощью пара.

Ударный способ выделения смолы является более совершенным, так как удар заставляет лопаться пузырьки вязких высококипящих компонентов смолы, и поэтому большинство применяющихся

в генераторных установках механических смолоуловителей основано на ударном действии.

2. Дезинтегратор Тейсена. К числу механических пыле- и смолоочистителей относятся дезинтеграторы. В эти аппараты вводится промывающая газ жидкость, которая распыляется благодаря центробежной силе и в мелкораспыленном состоянии хорошо смешивается с газовым потоком.

На рис. 189 представлен дезинтегратор Тейсена. Валом аппарата *а* приводится в быстрое вращение диск *б* с лопатками *в*. Внутрь аппарата газопроводом *г* подается газ и трубками *д* промывная жидкость (обычно смола), разбрызгиваемая благодаря вращению аппарата дырчатым конусом *е* по всему аппарату. В аппарате имеются кроме вращающихся лопаток *в* также и неподвижные лопатки *ж*, прикрепленные к кожуху *з*.

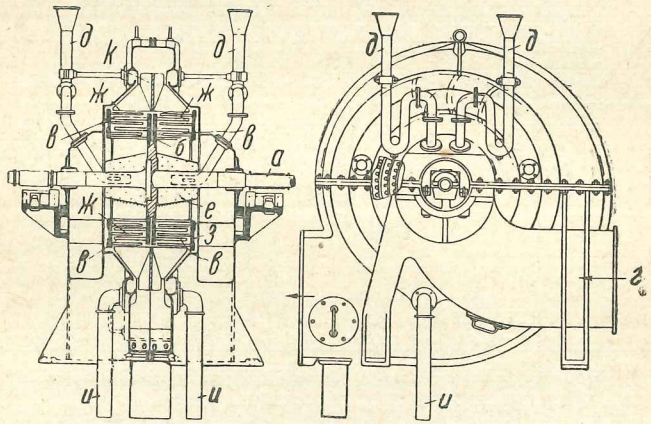


Рис. 189. Дезинтегратор Тейсена

Благодаря вращению диска *б* газ и жидкость отбрасываются к периферии и попеременно ударяются о движущиеся лопатки *в* и неподвижно прикрепленные к кожуху *з* лопатки *ж*. Происходит принудительное смачивание содержащихся в газе частиц, в результате чего взвешенные частицы из газа и частицы промывной жидкости укрупняются и выделяются, вытекая в нижней части через трубки *и*.

Лопатки *к* также нагнетают газ, выходящий в направлении стрелки, и аппарат является не только смолоочистителем, но и вентилятором.

Подшипники аппарата снабжены водяным охлаждением; привод — обычно от мотора.

Подобные аппараты потребляют большое количество энергии: при производительности в 2500—3000 *м*³/*час* затрата энергии составляет 4,5—5 и при большей производительности 3,5—4,5 *квт-ч* на 1000 *м*³ газа. Стоимость аппаратов небольшая. Экономичность их работы может быть повышена путем приведения в действие от паровой турбины с подачей мятого пара для увлажнения дутья.

За очистительными аппаратами обычно устанавливается каплеуловитель, в котором осаждаются увлекаемые газом капли смолы.

Каплеуловитель (рис. 190) представляет собой железный цилиндр с дном и крышкой. Газ входит в отверстие *1* и проходит через сито *2*, на котором лежит насадка высотой в 500 *мм* из телец, имеющих большую поверхность, например колец Рашига, и образующих многочисленные повороты. Пройдя насадку и выделив увлеченные капельки смолы, газ выходит через патрубок *3*. Отделяющаяся смола стекает через трубку *4*. Верхняя часть каплеуловителя *5* является хранилищем для смолы и для поддержания достаточной ее текучести подогревается змеевиком *6*. В это хранилище смола подкачивается насосом, а из него подается в дезинтегратор для промывки газа. Таким образом некоторое количество смолы, служащей для промывки газа, находится в кругообороте. Насадка может быть прогрета паром.

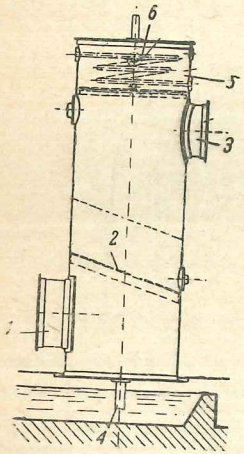


Рис. 190. Каплеуловитель

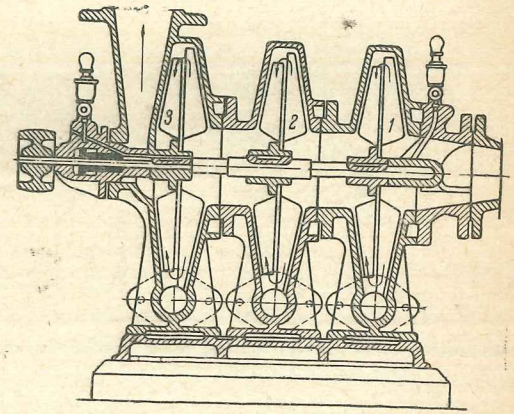


Рис. 191. Смолоотделитель Дейца

Из других конструкций дезинтеграторов следует отметить газопромыватели Цшоке, Шварца и Динглера [176], в которых в противоположность аппарату Тейсена вентилятор и дезинтегратор соединены не в одну конструкцию, а представляют собой две конструкции, или расположенные на одном валу (Цшоке) или же совершенно отделенные друг от друга (Шварц — Байера). Полное отделение дезинтегратора и вентилятора имеет преимущество в отношении меньшей затраты энергии вследствие того, что каждый аппарат может работать с оптимальным числом оборотов, но требует двух приводов и больше места.

В отношении качества работы преимущества на стороне дезинтеграторов Тейсена, вытеснивших другие конструкции.

3. Смолоотделитель Дейца. Несколько отличен способ очистки в аппарате Дейца (рис. 191). В нем для удаления смолы пользуются мелко распыленной горячей и холодной водой. Генераторный газ входит справа по направлению стрелок последовательно в ступени *1* и *2*

и орошается горячей водой. Затем газ попадает для окончательного охлаждения в ступень *3*, где орошается холодной водой. Имеющиеся между отдельными ступенями разделительные стенки с насаженными с обеих сторон лопастями направляют газ сначала к периферии отдельных ступеней, потом к середине и отсюда в соседнюю ступень; при этом газ хорошо орошается мелко распыленной водой.

Применение горячей воды имеет целью понизить вязкость смоляных оболочек капель.

Смола получается сильно обводненная.

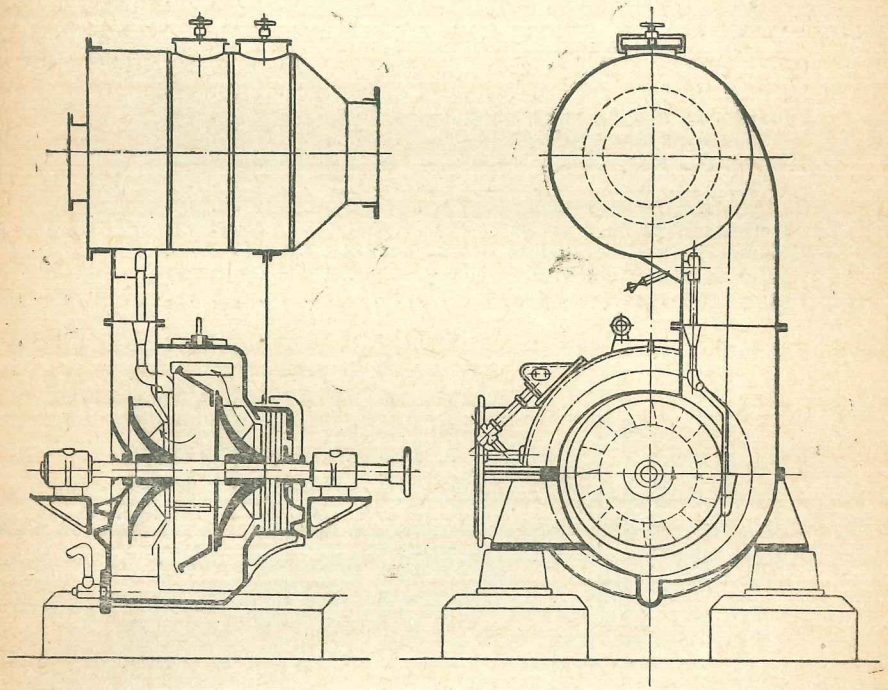


Рис. 192. Центробежный смолоотделитель—аппарат «Теервольф»

4. Смолоотделитель «Теервольф». Центробежный смолоотделитель другой конструкции — аппарат «Теервольф», соединенный с мотором или паровой турбиной, представлен на рис. 192. На его валу сидят две вентиляторные крыльчатки. Одна из них, соединенная с барабанным ситом, засасывает газ в направлении стрелки; при этом капли смолы, содержащиеся в газе и имеющие большой удельный вес, отбрасываются наружу к кожуху и через щель и трубку попадают внутрь вращающегося барабанного сита, мелко распыливающего смолу. При прохождении через сетчатый барабан газ насыщается смоляным туманом до такой степени, что образуются крупные смоляные капли, которые выпадают из потока.

Второй крыльчаткой вентилятора газ направляется тангенциально в лежащий выше каплеуловитель, из которого смола по трубе стекает в сетчатый барабан. Количество промывной смолы регулируется по

уровню в нижней части аппарата; для удаления избытка смолы имеется слив. Смолоуловитель «Теервольф» может создать лишь малое давление газа — порядка 50 *мм* вод. ст. Наиболее благоприятной температурой для его работы является интервал в 50—90°. При низких температурах увеличивается вязкость смолы и ухудшается ее распыливание, вследствие чего уменьшается эффективность промывки.

8-часовое испытание подобного аппарата дало следующие результаты [118]:

Давление перед смолоотделителем (в *мм* вод. ст.)	5
» позади смолоотделителя (в *мм* вод. ст.)	50
Температура газа при входе (в °С)	73
» газа при выходе (в °С)	67
Число оборотов мотора и смолоотделителя в мин.	1450
К. п. д. (в %)	80
Расход энергии на валу мотора (в *квт-ч*)	22,1
Мощность на валу мотора (в *кв*)	2,7
Количество полученной за 8 час. неочищенной смолы (в *кг*)	164,75
Содержание воды в смоле (в %)	2,1
Содержание пыли в смоле (в %)	1,1
Количество полученной за 8 час. чистой смолы (в *кг*)	159
То же в процентах от веса газифицированных брикетов	4,35
Количество газа (в *м*³/*час*)	1140

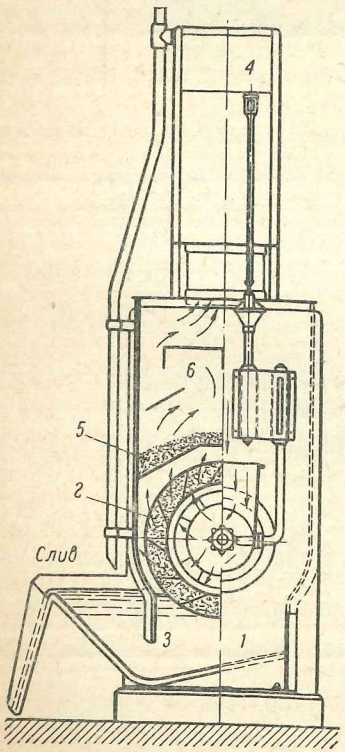


Рис. 193. Вращающийся фильтр Петри и Хекинга

Содержание смолы в газифицировавшихся буроугольных брикетах составляло, по лабораторным исследованиям, 6% от веса брикетов.

5. Вращающиеся фильтры. Принцип работы вращающихся фильтров Петри и Хекинга (фирма «Freitag-Metzler» в Дортмунде) основан на постоянном обновлении фильтра путем медленного вращения его и погружения нижней части в промывную жидкость.

Подобный фильтр представлен на рис. 193.

Очистка газа достигается пропусканием его с помощью вентилятора *1* через фильтрующее, медленно вращающееся и погруженное в смолу кольцо *2*. Это кольцо делается из железа и делится на отдельные ячейки промежуточными стенками. Характер заполняющего ячейки фильтрующего материала зависит от рода выделяемых частиц; он может состоять из органических или неорганических материалов (стальные стружки, кольца Рашига и т. п.). Фильтровальное колесо *2* погружено в корыто *3* со смолой, смачивающей его. Действие фильтра может быть улучшено установкой на валу вентилятора

кольца, разбрызгивающего смолу, подаваемую из бака *4*. Смола, улавливаемая фильтром, медленно стекает с него в резервуар *3*, снабженный сливом. Частицы смолы, унесенные из фильтра газами, улавливаются фильтром *5*, а также благодаря изменению направления газа посредством железных листов *6*.

Результаты [118], полученные при испытании очистки генераторного газа из смеси бурого угля, буроугольных брикетов, торфа и коксовой мелочи с помощью вращающегося фильтра, были следующие:

Количество газа (в *м*³/*час*)	3500—4000
Температура газа (в °С)	62
Количество смолы в неочищенном газе (в *г*/*м*³)	25
Расход энергии на 1000 *м*³ (в л. с.)	0,75—0,9
Повышение давления в аппарате (в *мм* вод. ст.)	30
Количество смолы и пыли в очищенном газе (в *г*/*м*³)	1,08
Степень очистки газа (в %)	96
Число об/мин. вентилятора	1140

Сравнительно с другими механическими конструкциями газоочистителей, потребляющими от 4 до 8 л. с. на 1000 *м*³ газа, вращающиеся фильтры имеют значительно меньший расход энергии, правда, при несколько худшей очистке, а сравнительно со статически действующими системами очистки — промывателями, холодильниками и т. п.—требуют меньших капитальных и эксплоатационных затрат и занимают меньше места. Эти фильтры имеют также то преимущество, что производительность их не зависит от числа оборотов фильтра.

В центробежном очистителе Хилькера используется для очистки газа от пыли и смолы также вращающийся фильтр. Эта конструкция отличается от других формой фильтрационного материала, его расположением в фильтре и специальным движением фильтра — попеременно в обе стороны.

Входящий газ первоначально омывается соответствующей жидкостью и затем проникает в фильтровальное колесо. Фильтр постоянно смачивается промывной жидкостью. Очищенный от взвешенных частиц газ попадает внутрь фильтра и отсасывается вентилятором. Вентилятор не загрязняется, так как через него проходит чистый газ. Осевшие в фильтре загрязнения и смола или вымываются промывной жидкостью при вращении и погружении в нее фильтра или удаляются с помощью действующего с большой силой разбрызгивающего промывного приспособления.

В качестве фильтрующих материалов применяются полые химически устойчивые тельца с гладкой поверхностью, имеющие удельный вес меньше единицы и всплывающие в жидкости. В связи с переменным движением колеса фильтра достигается постоянное перемещение и хорошая очистка заполнения фильтра. В этих аппаратах потребление энергии составляет примерно 0,5 л. с. на 1000 *м*³ газа в час [118]. Эксплоатационные расходы очень малы, так как фильтрующий материал может служить неограниченно долгое время.

6. Дисковые промыватели. Для очистки газа применяют также центробежные дисковые промыватели системы Штредера по схеме рис. 194.

Диски *2*, насаженные на двух параллельных валах *1* и погруженные нижней частью в промывную жидкость, вращаются в противоположных направлениях, разбрызгивая при этом жидкость в мелкую пыль по всему пространству *3*. Газ проходит под углом к направлению движения жидкости. Последняя удаляется из промывателя трубой *4*.

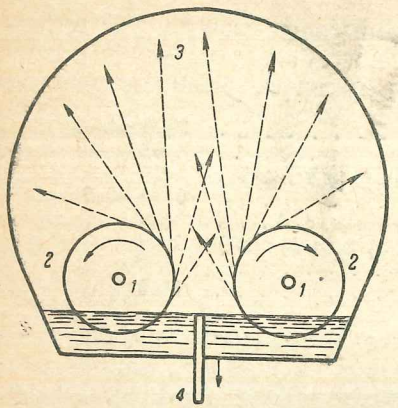


Рис. 194. Дисковый промыватель Штредера

Иногда на горизонтальные оси насаживают многочисленные, заполняющие весь барабан широкие и узкие винтообразные бросающие лопасти или пальцы, чередующиеся с черпающими лопастями. Газ захватывается лопастями и погружается в промывающую жидкость. При этом имеет место ударное действие частей, бесполезное для действия аппарата и сильно повышающее расход энергии. Эти приспособления имеют еще тот недостаток, что загрязняющие газ частицы, оседающие на внутренней поверхности аппарата, вновь подхватываются и бросаются лопастями.

Внешний вид аппарата представлен на рис. 195.

Дисковые промыватели применяются преимущественно для частичной очистки газа от смолистых или других веществ.

7. Аппараты «Пелуз». Иногда для отделения мельчайших капель

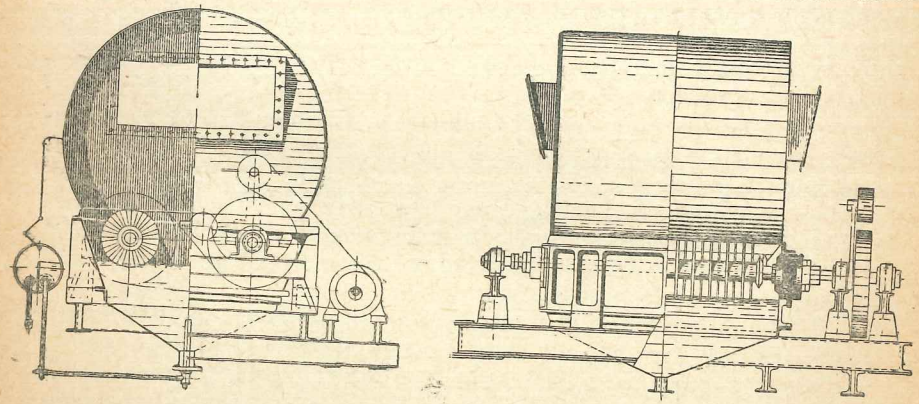


Рис. 195. Дисковый промыватель

легкой смолы применяется аппарат системы «Пелуз», представленный на рис. 196 и основанный на выпадении частиц под действием удара. Охлажденный газ, уже несколько очищенный от смолы, входит под колокол *1*, находящийся в железном кожухе *2*. Колокол *1* состоит из нескольких (до 4) входящих друг в друга сетчатых цилиндров

с отверстиями. Эти отверстия расположены на отдельных цилиндрах в шахматном порядке. Открытые снизу цилиндры погружены в смоляной затвор *3*. Колокол подвешен к штанге *4*; с помощью груза *5* можно поддерживать желаемое давление под колоколом.

Выделение смолы достигается благодаря удару вытекающего с значительной скоростью (15—20 *м/сек*) газа из отверстий на поверхность наружного цилиндра. Чем больше скорость вытекания газа, тем больше степень очищения.

Выпадающая в аппарате смола сифоном сливается в яму. Очищенный газ выходит через патрубок *6*.

При увеличении производительности и давления в аппарате колокол поднимается и большее число отверстий пропускает газ из-под колокола, сохраняя неизменной скорость движения газа. Если же, наоборот, давление падает, то колокол погружается в смолу так, чтобы площадь газовых отверстий соответствовала меньшему количеству протекающего газа.

Для хорошей работы аппарата температура газа не должна опускаться ниже 30°. При более низкой температуре смола сгущается и закупоривает отверстия колокола.

Для повышения эффективности аппарат орошается горячей смолой и цилиндры выполняются горизонтальными вращающимися, что способствует удалению загрязнений с цилиндров; путем подогрева смолы создается также возможность регулировать температуру выделения смол.

Аппараты «Пелуз» имеют большое сопротивление (70—90 *мм*) [183]. Степень достигаемой в них очистки ниже и поддержание определенной температуры труднее, чем в дезинтеграторах; кроме того они более громоздки. При наличии в смоле твердого парафина или других компонентов, имеющих высокую температуру затвердевания, происходит засорение отверстий цилиндров.

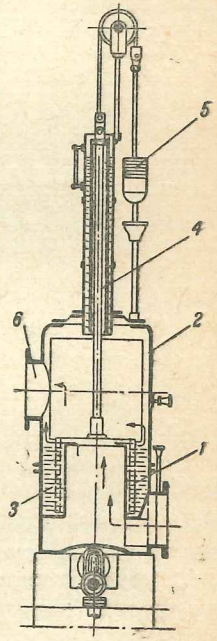


Рис. 196. Аппарат системы «Пелуз»

8. Фильтры. Для очистки газа от очень малых взвешенных частичек хорошие результаты дает метод, основанный на прилипании частичек к стенкам. Требуемая при этом большая поверхность прилипания образуется или с помощью тонких телец — пластинок, трубок и др., или посредством металлических спиральных нитей большей или меньшей толщины. Слишком тонкие металлические спирали или витки, имеющие целью увеличить очистительную способность аппарата, быстро изнашиваются вследствие того, что они подвергаются ударам.

О. Зорге (Берлин) устроил подобные фильтры из спиральных или витых металлических телец, спрессовывая их в кубики или шары (рис. 197) и помещая их таким образом, чтобы промежутки между тельцами были меньше самих телец. При этом значительно удлиняется путь газов или паров, движущихся зигзагообразно, как показано на рисунке стрелками, по пути наименьшего сопротивления, то сквозь

плотные тела *а*, то через свободные промежутки между ними. Видоизменение описанного метода заключается в том, что промежутки между телами из прочного вещества заполнены веществом менее прочным, но очищающим значительно лучше. Более прочное вещество в этом случае предохраняет менее прочное от разрушения (118).

В США с успехом полностью очищают генераторный газ от смолы, пропуская газ через насадку из стеклянной ваты. Как указывает Тау (192), выделение смолы достигается вследствие образования при трении газа о стеклянную вату электрических токов, вызывающих выделение смолы. Засорения ваты смолой не наблюдается.

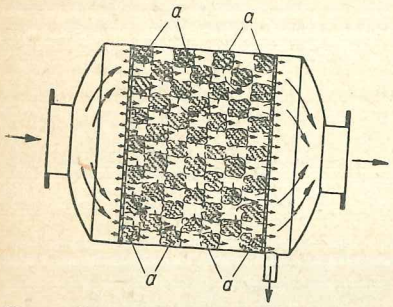


Рис. 197. Фильтр, основанный на прилипании частиц

Электрическая очистка газа

1. Принцип работы электрофильтров. В электрофильтрах газ проходит в поле высокого напряжения, и при этом взвешенные в газе частицы приобретают электрический заряд. Взвешенные частицы отдают свой заряд пассивному электроду, на котором осаждаются или с которого стекают (193, 194).

Принцип действия электрофильтра может быть объяснен следующим образом.

При наличии разноименных электродов и незамкнутой электрической цепи в ней отсутствует ток. Но если подействовать на пространство между электродами ионизатором (ультрафиолетовыми или рентгеновскими лучами, радиоактивными лучами или раскаленными телами), в цепи начинает протекать ток весьма малой силы (несамостоятельная ионизация). Этот ток вызван движением ионов и свободных электронов, имеющихся в некотором количестве в газовой среде. Чем больше разность потенциалов, тем сильнее воздействие на ионы и электроны, тем быстрее их движение и тем больше сила тока. Однако имеется предел, далее которого увеличение напряжения не влечет за собой увеличения силы тока. В этот момент наступает равенство количеств образующихся в газе и извлекаемых из газа ионов и электронов.

При отсутствии ионизатора и повышении напряжения первоначально тока в цепи не будет, но при некотором напряжении в цепи появляется ток, сила которого быстро растет с напряжением. Это явление называется самостоятельной ионизацией. Градиент напряжения превышает пробивное напряжение в части слоя газа, и молекулы газа расщепляются на ионы и электроны. При этом скорость ионов и электронов превышает так называемую критическую скорость, и их кинетическая энергия оказывается достаточной для расщепления при столкновениях нейтральных молекул. В результате появляется добавочное количество ионов и электронов, движущихся с наибольшей скоростью и выбивающих электроны из нейтральных молекул.

Вновь получившиеся ионы и электроны действуют аналогичным образом. Этот процесс называется ударной ионизацией. Получающиеся в результате ионы и электроны могут присоединять нейтральные молекулы. Ввиду появления в газовой среде большого количества ионов и электронов, могущих переносить электрические заряды, сила тока сильно возрастает.

Если полюсами служат две пластины, то электрическое поле во всех точках газового пространства однородно и образуется искровой разряд. Если подводить электрическое напряжение не к двум пластинам, а к проводу и трубе (или пластине), то напряжение будет неодинаковым для всех точек поля. Оно будет наибольшим у поверхности провода. При достаточном увеличении разности потенциалов появится ток, сила которого будет плавно возрастать.

Ионизация начинается тогда, когда градиент напряжения около провода превысит пробивное сопротивление газа. Пробивание должно происходить лишь на некотором расстоянии, представляющем собой часть всего расстояния между электродами. Часть газового слоя должна служить изоляцией и оставаться непробитой, в противном случае произойдет короткое замыкание между электродами через дугу или искру.

У поверхности излучающего провода образуется ионизированная зона короны, которая светится и издает легкое шипение.

В зоне короны движущиеся носители электричества расщепляют большое количество молекул, и зона короны заполнена положительными и отрицательными ионами и электронами. Провод является отрицательным электродом, и положительные ионы притягиваются к нему, отрицательные же ионы и электроны движутся через внешнюю зону к поверхности трубы. Вследствие малой концентрации силовых линий во внешней зоне ударной ионизации не происходит. При достижении поверхности трубы отрицательный заряд ионов и электронов нейтрализуется положительными зарядами от источника напряжения, аналогично положительные ионы нейтрализуются у провода отрицательными зарядами от источника напряжения. При излишнем повышении напряжения зона короны увеличивается, и наступает искровый пробой.

При данном напряжении поля скорость ионов и электронов тем больше, чем меньше сопротивление среды. Это сопротивление, а следовательно и пробивное напряжение, растет с плотностью газа. Температура и давление газа, изменяя плотность, влияют на величину пробивного напряжения.

Для воздуха оно составляет при давлении в 1 *ат* 21 *кв/см* и при давлении в 10 *ат* — 210 *кв/см*, что объясняется уменьшением подвижности ионов с увеличением давления.

Если в газе содержится кислород, то в зоне короны образуется некоторое количество озона.

Содержащиеся в газе взвешенные частицы — пыль и капельки смол — в электрофильтрах проходят в основном (так как область короны невелика) во внешней зоне. В этой зоне находятся только носители отрицательного электричества, и взвешенные частицы в результате столкновения с ними могут заряжаться лишь отрицательно

и будут двигаться к положительному электроду — к трубе (или пластине). Достигнув положительного электрода, взвешенная частица пристает к нему, и заряд ее нейтрализуется отрицательным зарядом, подошедшим от источника напряжения. Чем крупнее частица, тем больше оседает на ней электронов и тем легче ее уловить.

В зоне короны частицы могут столкнуться с положительными или отрицательными ионами и электронами, сообщающими пылинкам заряд. При последовательных столкновениях с ионами и электронами заряд частиц может изменяться по величине и по знаку. Преимущественно изменение идет с положительного заряда на отрицательный.

Заряженные отрицательно частицы движутся к внешней поверхности зоны короны, попадают во внешнюю зону и достигают положительного электрода. Заряд их связывается зарядом, подошедшим к положительному электроду от источника напряжения. Заряженные положительно частицы в зоне короны движутся в направлении провода, достигнув, оседают на нем, и заряд их связывается зарядом от источника напряжения.

При покрывании коронирующего электрода проводящей пылью увеличивается его диаметр, а следовательно уменьшается коронирование вплоть до его прекращения. При этом также уменьшается расстояние между трубой и проводом и пробивное напряжение.

Покрывание коронирующего электрода непроводящей пылью ухудшает очистку, так как он изолируется. Покрывание труб непроводящей пылью замедляет отдачу заряда оседающей вновь пыли; возможно даже отталкивание заряженными осевшими частицами приближающихся к ним новых частиц, новых газовых ионов и электронов и в результате — унос частиц пыли газом.

Заряженные частицы и ионы устремляются при запыленных трубах к тем участкам труб, в которых запыленность наименьшая; силовые линии в направлении этих участков сгущаются, напряжение поля становится настолько большим, что у этого участка труба начинает коронировать. Область короны у трубы заполняется положительными и отрицательными ионами, отрицательные ионы притягиваются, а положительные направляются к проводу. При этом происходит нейтрализация отрицательных ионов и электронов, движущихся от провода. Сила тока увеличивается, но очистка ухудшается. Кроме того пробой наступает при положительной короне при меньшей разности потенциалов, и при коронировании осадительного электрода нельзя поддержать нужную разность потенциалов.

Во избежание неблагоприятного влияния осаждающейся на электродах пыли их очищают путем встряхивания. Жидкие частицы стекают с электродов.

Взвешенные частицы размером менее 10^{-7} *см* (молекулярно-дисперсное состояние) не подвергаются воздействию электрического заряда (в смысле осаждения); при бо́льших размерах они могут быть выделены.

Частицы размером менее 10^{-5} *см* не подчинены действию силы тяжести и центробежной силы; поэтому выделение их механическим путем в сухих пылеуловителях невозможно. Эти частицы также не смачиваются водой, почему невозможно и вымывание их водой. Элек-

трические заряды действуют на подобные частицы, увеличивая их до тех пор, пока они не достигнут предела воздействия на них силы тяжести. Следует также отметить, что мелкие частицы, получившие заряд, при охлаждении газа ниже точки росы становятся благодаря заряду центрами конденсации и, обволакиваясь водой, оседают (или в электрофильтре или в скруббере).

В результате заряжения взвешенных частиц имеют место два процесса:

1) заряженные и незаряженные частицы притягиваются и соединяются в крупные капли или частицы, которые вследствие своей тяжести выпадают;

2) заряженные определенным электрическим зарядом частицы отталкиваются от одноименного (активного) полюса, притягиваются к полюсу с противоположным зарядом, нейтрализуются здесь, скапливаются все в большем количестве и выпадают сами или с помощью встряхивания.

Ионы и частицы, движущиеся от излучающего провода, беспрепятственно достигают поверхности второго полюса, движущиеся же к проводу сталкиваются с тем бо́льшим количеством свободных электронов, чем ближе подходят к проводу; в результате происходят их нейтрализация и перезаряжение. Достигают провода только немногие ионы и частицы.

Преимущественное значение имеет осаждение частиц на электродах, так как притяжение частиц может быть при их разноименном заряде, т. е. при короне переменного тока.

Частицы некоторых веществ плохо осаждаются в электрофильтрах, и для улучшения осаждения их приходится подготавливать — увлажнять, создавать определенную температуру и т. д.

Влияние влажности газа на степень очистки его очень велико, и с увеличением содержания влаги качество очистки улучшается.

Содержание в газе влаги целесообразно увеличивать при осаждении взвешенных частиц из влажного газа с температурой выше точки росы в тех случаях, когда пыль по своим свойствам плохо воспринимает заряд или газ выходит из технологического процесса ионизированным и вызывающим беспорядочное изменение зарядов в электрофильтре или пыль является малопроводящей. Увеличение влажности газа приводит к адсорбции паров отдельными частицами пыли, увеличению проводимости этих частиц и улучшению способности заряжаться.

При необходимости очень высокой степени очистки газа взвешенные в газе частицы осаждают при температурах ниже точки росы газа, так как самые мелкие частицы в сухом виде не могут быть выделены вследствие незначительности получаемого ими заряда. При понижении температуры газа ниже точки росы на взвешенных частицах, как на центрах конденсации, происходит осаждение паров воды, и электроны увлекают взвешенные частицы вместе с их водной оболочкой. При электрической очистке газ освобождается также от сконденсировавшейся влаги.

Несмотря на удобство и дешевизну пользования переменным током и возможность трансформировать ток низкого напряжения до необхо-

34* 000/1

димого для электрофильтров напряжения или пользоваться током с высоковольтных линий, для электрофильтров пользуются исключительно постоянным током, требующим повышения напряжения переменного тока и последующего его выпрямления. Излучающие электроды являются отрицательным полюсом, осадительные, заземленные – положительным.

Опыт показывает, что при постоянном токе отрицательного знака степень очистки составляет 95—98%, при положительном постоянном токе — 70—80% и при переменном токе—только 50%.

Ухудшение очистки при применении переменного тока объясняется переменным действием притягивающих и отталкивающих сил. Преимущества отрицательного тока объясняются возможностью поддерживать при нем без пробивания более высокое напряжение, чем при положительном токе, что увеличивает напряжение поля, диаметр короны и улучшает осаждение. Кроме того скорость отрицательных ионов при одном и том же напряжении поля бо́льшая, что также способствует лучшей очистке газа.

2 Оборудование электрофильтров. Для получения тока высокого напряжения пользуются трансформаторами, в которых обычный переменный ток в 220, 380 или 500 *в* трансформируется на 40 000—80 000 *в*.

Ток выпрямляется обычно с помощью вращающегося выпрямителя, соединенного с синхронно вращающимся мотором, в пульсирующий постоянный ток. Отрицательный полюс выпрямителя соединяется с хорошо изолированным излучающим электродом; положительный полюс соединяется с осадительным электродом и заземляется. Выпрямление может также производиться с помощью мотор-генератора или катодных ламп.

В стандартный комплект повышающе-выпрямительного агрегата, стандартизованный трестом «Газоочистка», входят: высоковольтный трансформатор, автотрансформатор с коммутатором для регулирования напряжения, мотор с выпрямительным крестом, реостат, щит с вольтметром, амперметром и миллиамперметром, сигнальными лампами и рубильником, дроссели, радиозащита и дверь с предохранительным контактом.

В машинном отделении устанавливается несколько агрегатов, что связано с ограниченной мощностью агрегатов, необходимостью иметь в различных камерах различное напряжение и необходимостью в наличии резерва (193.).

3. Трубчатые и пластинчатые электрофильтры. Электроды, на которых осаждаются взвешенные в газе частицы, выполняются или в виде пластин или в виде труб, а активные излучающие электроды — в виде проволок.

Форма электродов имеет значение в отношении равномерности распределения электрического поля и количества потребляемого тока.

Для подвески излучающих электродов служат фарфоровые или кварцевые изоляторы.

Несмотря на высокие применяемые напряжения, опасность коротких замыканий мала, так как сила тока составляет тысячные доли ампера.

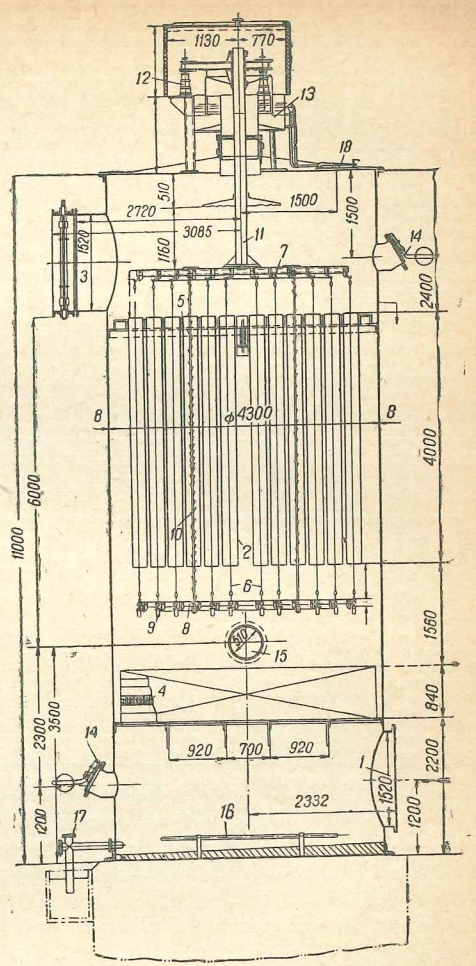
На рис. 198 представлен трубчатый электрофильтр, спроектированный трестом «Газоочистка». Газ входит в электрофильтр через штуцер *1*, поднимается вверх через трубы *2* и отводится через штуцер *3*.

Для лучшего распределения газов по сечению под трубами расположена насадка *4*. Трубы подвешиваются на трубной решетке *5* из листовой стали. Они служат осадительными электродами. Внутри каждой трубы по оси строго вертикально натянут коронирующий провод *6* (нихромовая проволока диаметром в 2 *мм*). Коронирующие провода подвешиваются на крючках к верхней коронирующей раме *7*, собранной из полосовой стали и балок. На коронирующих проводах подвешены грузы *9*, натягивающие их. Нижняя коронирующая рама *8* препятствует отклонению проводов от центра осадительных труб. Нижняя рама подвешивается к верхней с помощью четырех тяг *10*, проходящих по центру трубы и также служащих коронирующими проводами.

Вся коронирующая система — верхняя и нижняя рамы и провода—подвешена с помощью газовой трубы *11* на опорной конструкции и покоится на изоляторах *12*. Уплотнение достигается с помощью масляного затвора *13*.

Во избежание конденсации водяных паров коробка, перекрывающая изоляторы, снабжается помимо изоляции паровой рубашкой.

Электрофильтры снабжаются изоляцией: внешней —



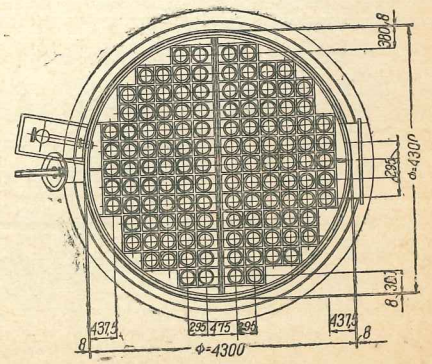


Рис. 198. Трубчатый электрофильтр

для уменьшения потерь тепла и внутренней — в случае опасности разъедания уксусной кислотой (просмоленный войлок), а также предохранительными клапанами *14* и лазами *15*.

Для обеспечения стока смолы к штуцеру *17* на дне электрофильтра, выполненному с уклоном, укладывается паровой змеевик *16*, особенно необходимый при пуске аппаратов после останова.

Преимуществом трубчатых камер являются лучшее распределение электрического поля и лучшее распределение газа, что дает возможность увеличить производительность аппарата сравнительно с пластинчатым и достичь лучшей очистки газа.

Недостатки трубчатых камер следующие: монтаж их сложнее, отряхивание излучающих проводов затруднительно и возможно качание проводов, так как нижняя направляющая рама подвешена на самих проводах.

Трубчатые камеры применяют в случаях трудности осаждения взвешенных частиц вследствие их соответствующих свойств, при необходимости в более тонкой очистке газа и при осаждении туманов жидкостей, когда не требуется встряхивания электродов.

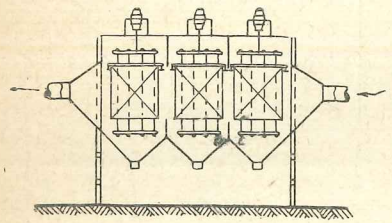


Рис. 199. Схема устройства пластинчатого электрофильтра

Трубы обычно применяются железные диаметром в 200—300 *мм* и длиной в 3000—4000 *мм*.

На рис. 199 представлена схема прямоугольного аппарата с пластинами. В нем газ движется в горизонтальном направлении, иногда — в несколько ходов. Осадительные пластины помещаются обычно параллельно потоку газов. Иногда их делают в виде густой сетки, натянутой на раме для предупреждения коробления. Сетчатые пластины могут располагаться перпендикулярно потоку газов. Пластины больших размеров могут состоять из отдельных полос.

Иногда пластины делают из полупроводника — бетона, что преследует цель уменьшения силы отталкивания частицы, отдавшей электроду свой заряд и перезарядившейся. Сопротивление пластинчатого электрофильтра не более 10 *мм* вод. ст.

Преимуществом пластинчатых электрофильтров является: простота монтажа, удобство отряхивания электродов и возможность увеличения размеров без увеличения числа камер (увеличение числа или длины труб в трубчатых электрофильтрах затруднительно).

Пластинчатые аппараты имеют большую производительность — до 70 000 $м^3/час$, тогда как трубчатые только до 30 000—35 000 $м^3/час$. Недостатком их является худшее распределение электрического поля сравнительно с трубчатыми аппаратами и затруднительность получения равномерного распределения в них потока газов. В случае взрыва они легче деформируются. Коронирующие электроды выполняются обычно из гладкой проволоки небольшого диаметра (1—5 *мм*). Материалом для проволок служат железо и сталь, в специальных случаях — другие металлы или сплавы.

4. Расчет электрофильтров. При расчете [194] электрофильтров руководствуются следующими примерными данными. Градиент напряжения g, т. е. количество киловольт, приходящихся на 1 *см* кратчайшего расстояния L *см* между разноименными электродами, составляет около 5 *кв/см*, т. е. напряжение между электродами E *кв* определяется из выражения:

$$E = Lg.$$

Для холодных газов принимается $g = 4{,}3—4{,}5$ *кв/см*, для горячих 3,8—4 *кв/см*.

Расстояние между электродами L колеблется в пределах 7,5—20 *см* и в среднем составляет 15 *см*. Напряжение берется в пределах 35—70 *кв*.

Расход энергии может быть исчислен по силе тока, составляющего примерно 0,5 *ма* на 1 *пог. м* трубы радиусом в 15 *см*; 0,6—0,7 *ма* — для больших радиусов (20 *см*) и 0,3—0,4 *ма* для малых радиусов (10 *см*).

Для пластинчатых аппаратов, если расстояния между коронирующими проводами равны двойному расстоянию между разноименными электродами, те же величины (0,3—0,4; 0,5 и 0,6—0,7 *ма*) могут быть отнесены к 1 *пог. м* провода при соответствующих расстояниях между разноименными электродами в 10, 15 и 20 *см*. Длину провода следует считать равной размеру осадительного электрода в направлении, параллельном проводу.

При расстоянии между проводами, меньшем двойного расстояния между разноименными электродами, во столько же раз уменьшается и сила тока, приходящаяся на 1 *пог. м* провода.

При уменьшении расстояния между соседними проводами не увеличивается общая сила тока. Объясняется это тем, что сближенные провода препятствуют друг другу коронировать (неравномерность электрического поля), но увеличение числа проводов компенсирует уменьшение силы тока, приходящегося на каждый провод. До расстояния между проводами, равного кратчайшему расстоянию между разноименными проводами (как минимальному), общая сила тока не зависит от расстояния между ними.

Произведение силы тока в *ма* на напряжение в *кв* дает расход энергии в *квт*. Мощность, требуемая для подстанций, определяется с учетом к. п. д. трансформаторов в 85—90%.

В трубчатых электрофильтрах принимаются скорости в 1—2 *м/сек*, в пластинчатых меньшие.

5. Данные о конструкциях и работе электрофильтров. Электростатический способ, как и механический, может в зависимости от температуры газа служить для различной степени очистки. При температуре выше точки росы водяного пара возможно выделить почти безводную смолу, при более низких температурах возможно выделить также взвешенную и конденсирующуюся влагу с легкими маслами, которые можно отделить друг от друга.

В табл. 88 приведены [191] данные о работе электрофильтров для очистки газов от смолы и пыли.

Для предупреждения сильного охлаждения газа в электрофильтрах и конденсации влаги их покрывают термоизоляционным слоем.

Таблица 88

Данные о работе электрофильтров

Устанавливавшая фирма (организация) или место установки	Назначение	Колич. газа в *нм³/час* или топлива *т*/24 *часа*	Путь газа из генератора до электрофильтра	Температура газа (в °С)		Потребление энергии (в *квт*-ч на 1000 *нм³*)	Степень очистки (в *г/нм³*)			Примечание
				в 1-й ступени	во 2-й ступени		сырой газ	после 1-й ступени	очищенный газ	
Лурги	Очистка от смолы буроугольного генераторного газа	855	—	80—100	20—30	1,3	20	—	0,04	—
Лурги	То же	—	—	90	30—40	—	30	0,7	0,01—0,02	—
Иенские стекольные заводы	»	100—200 *т* брикетов бурого угля	Пылеуловитель и трубчатый холодильник	80—90	30—40	1,9 на 100 *кг* смолы	9% от веса топлива	—	1% от начального содержания в сыром газе	Содержание смолы в брикетах по лабораторным исследованиям — 14% и влаги—21%
Лурги	»	—	—	При входе 83—110, при выходе 75—85	—	1,8	30	0,2—0,3	0,01—0,02	Потеря давления на всем пути—15—20 *мм*. В первом очистителе осаждено 3,44% смолы, во втором—масел—0,69% Смолы в угле—4,61%
Лурги	»	61,45 *т* брикетов бурого угля	Пылеуловитель и охладитель	90—100	20—30	1,2	—	—	—	Выход смолы и масла составил 6,65% от веса топлива; содержание смолы в брикетах—6,72%
Сименс и Шуккерт	Очистка от пыли доменного газа	2850—4100	—	76—130		—	1,72—14,90	0,060—0,340	—	Скорость газа — 3,06 — 3,96 *м/сек*
Сименс и Шуккерт	То же	3500—3900	—	84—118		—	6,10—30,50	0,001—0,051	—	Скорость газа — 2,18 — 2,45 *м/сек*
Эльга	»	40 000	—	60		2,5	4—6	0,015—0,020	—	Скорость газа—3 *м/сек*
Ленинградский физико-химический институт	Очистка генераторного газа из подмосковного угля (Щекинский завод)	—	—	—		—	12,9	0,52	—	Опытная установка

Степень очистки электрофильтром зависит от скорости, температуры и влажности газа. Через короткое время после пуска условия работы электрофильтров ухудшаются. Пыль садится не только на осадительные электроды, но и на коронирующие.

При улавливании из газа смол по возможности до электрофильтра газ очищают от пыли, так как последняя выделяется вместе со смолой, и если в газе содержится много пыли, консистенция смолы получается слишком густой, смола накапливается на трубах или пластинах, что вызывает необходимость очистки фильтра.

При горячих газах бывают внезапные быстрые увеличения силы тока, часто вызывающие пробивание изоляторов; пробиванию может способствовать и осаждение на изоляторах паров воды или смол, для предупреждения чего изоляторы подогревают.

Так же как и при механической очистке, в случае наличия в газе уксусной кислоты, следует принимать предохранительные меры для защиты металлических частей от преждевременного износа: применяют специальные более стойкие сорта металла, более толстые части, изоляцию и т. д.

В условиях электрического поля в электрофильтрах и коронного разряда газ при наличии искры или пробоя взрывается даже при нахождении в нем кислорода в количестве, не соответствующем обычной взрывчатости смеси [1]. Поэтому необходимо тщательно следить за плотностью аппаратуры, избегать образования в системе до электрофильтра разрежения, связанного с опасностью присоса воздуха, и следить за составом газа.

В соответствии с взрывоопасностью электрофильтра при установке его предъявляются соответствующие требования в отношении отделения от прочего оборудования и зданий.

Трест «Газоочистка» дает следующие данные для электрофильтров, проектируемых для очистки генераторного газа.

При производительности аппарата в 12 000—15 000 $м^3$ газа (при 85°) камера имеет диаметр в 3500 *мм*. Высота камеры с фундаментами и изоляторными коробками — 9200 *мм*. На трубной решетке подвешено 55 труб диаметром в 250 *мм* (скорость — 1,2—1,5 *м/сек*) и высотой в 4 *м*. Газ входит в межтрубное пространство на высоте в 4900 *мм* и отводится после выхода из труб на высоте в 6600 *мм*. Коронирующие провода имеют диаметр в 2 *мм* и выполняются при угольном или коксовом газе из железа и при дровяном или торфяном во избежание разъедания уксусной кислотой — из нихрома. Верхняя рама коронирующих проводов подвешена на штангах в трех точках; нижняя рама висит на самых проводах, причем она сделана гибкой, чтобы не натягивать чрезмерно отдельных проволок.

Изоляторы укреплены в цилиндрических коробках на верхней крышке камеры и изолированы от газа масляными ваннами. В случае загрязнения трансформаторного масла смолой возможна работа без масляной ванны; при этом во избежание конденсации на изоляторах смол и легких масел изоляторные коробки обогреваются паровыми рубашками. Помимо предохранительных клапанов с противовесами,

[1] Недостаточно установлено.

которыми снабжен кожух, в крыше электрофильтра продусмотрены пружинные клапаны.

Толщина листов кожуха — 7 *мм*. Полный вес камеры с трубами из 3-миллиметрового железа составляет 18 *т* и с трубами толщиной в 7 *мм* (цельнотянутые) — 24,5 *т*. Две такие камеры питаются от одного стандартного электроагрегата.

Пропускная способность малых камер — 5000—6000 $м^3/час$. Диаметр их — 2500 *мм*, высота — 8065 *мм*, полный вес — 1 *т*. Они снабжены 24 трубами диаметром в 250 *мм* и длиной в 3 *м*.

Более новая конструкция производительностью 25 000—35 000 $м^3/час$ представлена на рис. 198.

Газогенераторстроем проектировались электрофильтры горизонтального типа. Примерная скорость газа в них — 0,8 *м/сек* и время пребывания газа в электрическом поле — 7 сек. Для экономии места они выполнялись в несколько ходов и для экономии металла — из железобетона.

6. Сравнение электрофильтров и аппаратов Тейсена. Расход энергии в электрофильтрах на очистку газа не превышает 0,5 *квт-ч* на 1000 $м^3$ газа, и следовательно, даже с учетом расхода энергии на нагнетание газа (2—2,5 *квт-ч* на 1000 $м^3$), он значительно меньше, чем при аппаратах Тейсена.

В табл. 89 приведено сравнение затрат при очистке от смолы торфяного газа аппаратами Тейсена и электрофильтрами для производительности в 44 000 $м^3/час$ (0°, 760 *мм*) в двух аппаратах Тейсена (3-й — резервный) или трех электрофильтрах (4-й — резервный). Изготовление частей аппаратов Тейсена предположено из кислотоупорной стали во избежание коррозии уксусной кислотой [1].

Таблица 89

Сравнение стоимости различных способов очистки газа

Электрофильтры		Дезинтеграторы	
1. Капитальные затраты			
Полная стоимость электрофильтров, подстанции, вспомогательного оборудования и пр.	424 000 руб.	Стоимость аппаратов Тейсена, каплеуловителей, насосов, арматуры, моторов, пускового оборудования, подводки тока и пр. . . .	390 000 руб.
Стоимость нагнетательной установки (вентиляторы и моторы) . .	39 900 »	Монтаж, фундаменты, накладные расходы (25% от стоимости оборудования)	97 500 »
Стоимость гидравлических затворов	13 500 »		
	477 400 руб.		487 500 руб.

[1] Расчет произведен ленинградским отделением Газогенераторстроя.

(продолжение табл. 89)

Электрофильтры	Дизентиграторы
2. Эксплоатационные годовые затраты (без электроэнергии)	
Обслуживание, включая 100% накладных расходов на рабочую силу 19 200 руб. Смазка . . . . . 1 200 » Ремонт . . . . . 4 000 » Масло трансформаторное . . . . . 2 400 » 26 800 руб.	Обслуживание (рабочие и слесаря) . . . . . 21 600 руб. Смазка . . . . . 2 400 » Ремонт . . . . . 12 000 » Охлаждающая вода для аппарата Тейсена (3 $м^3$ на каждый в сутки) 540 » 36 540 руб.
3. Затраты на электроэнергию в час	
Стоимость электроэнергии для фильтров . 5 р. 30 к. Стоимость энергии для нагнетания газа: 150 *квт-ч*·0,12 = 18 р. 23 р. 30 к.	Стоимость электроэнергии, расходуемой на аппарат Тейсена: 524 *квт-ч*·0,12 = 63 руб.

Сводя затраты к 1 часу и к 1000 $м^3$ газа, полагая амортизацию капитальных затрат в 10 лет и работу в течение 360 дней в году, получаем данные, приведенные в табл. 90.

Таблица 90

Сводка затрат на очистку газа (в коп.)

Затраты	В электрофильтрах		В аппаратах Тейсена	
	в час	на 1000 $м^3$	в час	на 1000 $м^3$
Капиталовложения . . .	5,50	12,5	5,65	12,8
Эксплоатация	3,10	7,1	4,23	10,6
Электроэнергия	23,30	53,4	63,00	143,6
	31,90	73,0	72,88	167,0

Большая стоимость больших аппаратов Тейсена объясняется сложностью их изготовления и необходимостью в условиях торфяного газа, из опасения разъедания уксусной кислотой, изготовления их из специальной кислотоупорной стали. При изготовлении аппаратов Тейсена из менее ценных сортов стали стоимость их должна быть значительно ниже.

Сравнение показывает снижение расходов при электроочистке в 2,3 раза и потребления энергии в 2,7 раза.

Если в отношении экономики аппараты Тейсена уступают электрофильтрам, то все же необходимо отметить, что они компактны, проще и менее взрывоопасны, чем электрофильтры.

Для малых и средних установок, несмотря на большую стоимость эксплоатации, следует рекомендовать в качестве смолоулавливающих приспособлений аппараты Тейсена.

Только в больших установках экономия, достигаемая применением электрофильтров, столь велика, что возможно итти на установку более громоздкого, сложного и требующего высококвалифицированного обслуживания аппарата.

6. МОКРАЯ ОЧИСТКА СМОЛИСТОГО ГАЗА

При газификации смолистых топлив газ уносит из генератора пыль, смолу и сажу. Целью мокрой очистки является освобождение газа от этих примесей.

Обычно для улавливания смолы применяются специальные смолоотделители; газ перед поступлением в них подвергается некоторой подготовке, зависящей от его температуры и содержания в нем пыли и сажи.

Температура генераторного газа

При работе на генераторах без швельшахты температура газа составляет примерно (в °С):

Для воздушносухих дров и торфа	200—300
» очень влажных » » »	100—150
» влажного бурого угля (подмосковный)	70—125
» бурого угля менее влажного (челябинский)	200—350
» брикетов бурого угля (германские данные)	300—450
» каменного угля	500—700

В случае работы на генераторах со швельшахтой температура газа колеблется в пределах 75—130°.

Если температура газа при выходе из генератора превышает 100°, то газ подвергается охлаждению в стояке до температуры 75—87° (на 10—15° выше точки росы), наиболее благоприятной для получения мало обводненной смолы и работы смолоотделителя. Охлаждение газа в стояке производится специальными приспособлениями, распыливающими воду.

Часть распыливаемой воды испаряется, понижая температуру газа, часть же собирается у основания или в затворе стояка, причем выпадающей частью воды увлекаются из газа наиболее тяжелые смолистые вещества и часть пыли и сажи.

Выделение из газа взвешенных частиц до и после смолоотделения

Смолу желательно улавливать возможно более очищенной от сажи и пыли, чем достигается улучшение качества смолы и лучшая работа смолоотделителей. Поэтому в целях лучшей очистки газа от пыли и сажи при их большом содержании и достаточно высокой температуре газа—во избежание конденсации смол—до стояка-охлади-

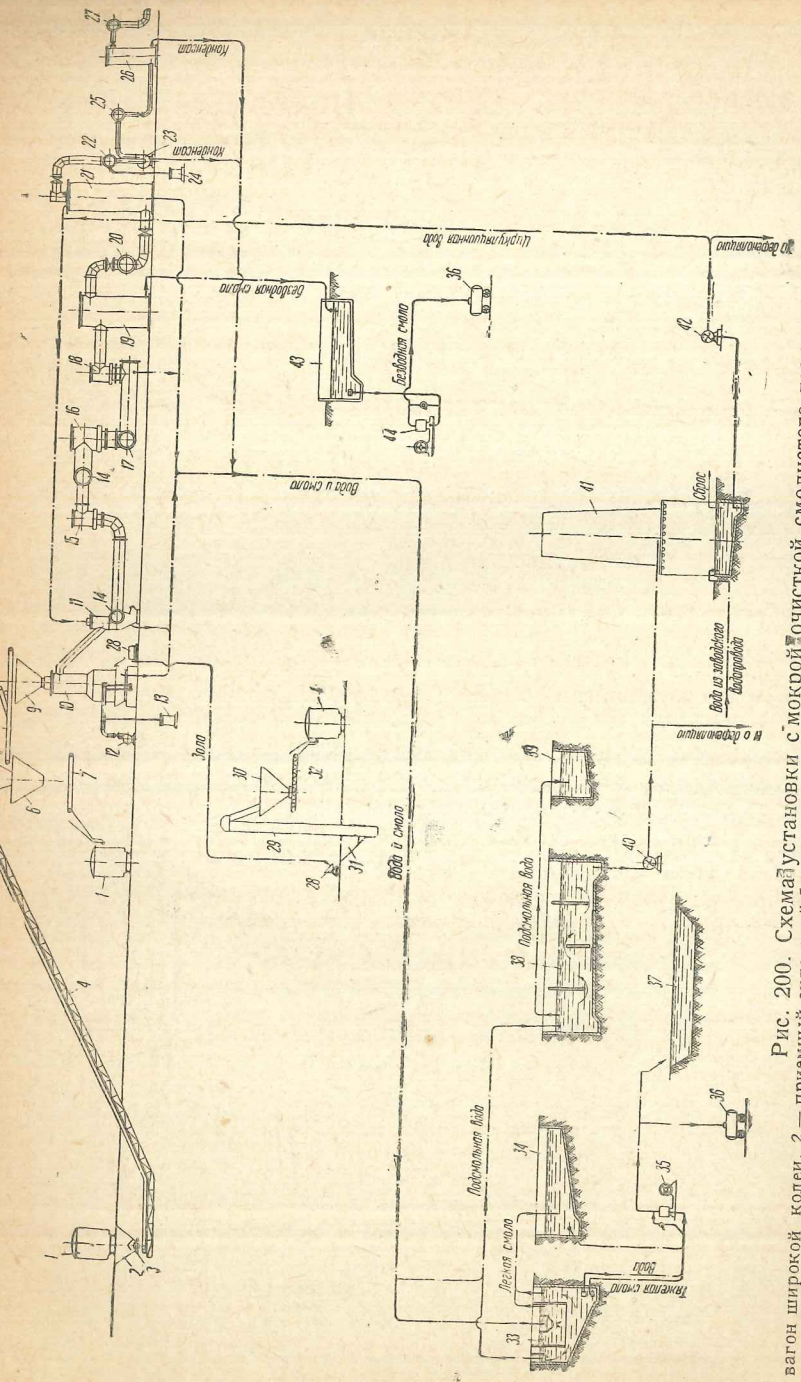


Рис. 200. Схема установки с мокрой очисткой смолистого газа:
1 — вагон широкой колеи, *2* — приемный складской бункер, *3* — ленточный транспортер под приемными бункерами *4* — ленточный транспортер эстакады, *5* — грохот для отсева мелочи, *6* — бункер для мелочи, *7* — ленточный транспортер для мелочи. *8* — ленточный транспортер над бункерами генераторов со сбрасывающей тележкой, *9* — бункер генератора, *10* — генератор, *11* — стояк, *12* — воздушный вентилятор, *13* — регулятор количества воздуха, *14* — коллектора сырого газа (одного и двух рядов генераторов), *15* — тарельчатый клапан газопровода от одного ряда генераторов, *16* — тарельчатый клапан общего газопровода, *17* — коллектор перед электрофильтром, *18* — тарельчатый клапан, *19* — электрофильтр, *20* — коллектор газа перед скруббером, *21* — скруббер, *22* — коллектор после скруббера, *23* — газовый вентилятор I ступени, *24* — регулятор давления газа, *25* — коллектор газа перед каплеуловителями, *26* — каплеуловитель, *27* — коллектор газа, *28* — вагонетка для золы, *29* — элеватор для золы, *30* — зольный бункер, *31* — приемный зольный бункер, *32* — шнек, *33* — отстойная яма, *34* — яма для сбора масел, *35* — насос для перекачивания смолы, *36* — цистерна для отвозки смолы, *37* — аварийные смоляные ямы, *38* — яма для погрузки смолы, *39* — насос циркуляционной системы I ступени, *40* — насос циркуляционной системы II ступени, *41* — градирня циркуляционной системы, *42* — яма для погрузки смолы, *43* — яма для смолы от электрофильтра

теля иногда устанавливают пылеуловители, что не выявило преимуществ.

После прохождения газа через смолоотделитель значительная часть смолистых веществ остается в газе преимущественно в виде паров и частично в сконденсированном виде.

Большая часть их вымывается в водяном скруббере, куда попадает газ из смолоотделителя. В газе, выходящем из скруббера, содержится 1—1,5 *г/м*³ масел и некоторое количество механически увлеченной влаги.

В случае установки в качестве смолоотделителя дезинтегратора последний сам создает давление, необходимое для подачи газа в сеть; если же смолоотделителем является электрофильтр или другое приспособление, не повышающее давления газа, то газ по выходе из скруббера попадает в газовый вентилятор, который нагнетает его в сеть.

Так как в газовом вентиляторе частицы влаги и смолы укрупняются, за газовыми вентиляторами устанавливаются «сухие скрубберы»-каплеуловители, заполненные кольцами Рашига или коксом, в которых благодаря ударам, изменению направлений и трению выделяются наиболее крупные взвешенные в газе частицы.

Схемы установок

При газификации топлив, выделяющих при сухой перегонке много смолистых веществ, помимо обычных генераторов часто применяют газогенераторы со швельшахтой как в целях получения большего количества лучшей по качеству смолы, так и улучшения хода генератора.

При влажных топливах (древесине, торфе, буром угле) генераторы со швельшахтой применяют с одним отъемом газа, и следовательно при газификации подобных топлив в генераторах со швельшахтой или без таковой очистке от смолы подвергают весь газ.

В случае газификации сухих углей (преимущественно каменных углей или брикетов бурого угля) с улавливанием смолы, как известно, применяют генераторы с двойным отъемом газа. Газ из нижнего отъема из собственно шахты представляет собой газ, полученный из полукокса.

Очистка газа нижнего отъема аналогична очистке газа из кокса. Трубчатые котлы могут быть применены лишь в случае достаточных размеров швельшахты и полного выделения в ней смолистых веществ, на что не всегда можно рассчитывать.

Очистка газа верхнего отъема (из швельшахты) производится также, как и очистка каменноугольного газа из обычных генераторов. Получаемый из обоих отъемов газ обычно после очистки смешивают.

В случае применения специальных аппаратов для улавливания смолы обычно применяются следующие схемы установок.

1. Для дров, торфа и влажного бурого угля — генератор, стояк-охладитель, коллектор газа, смолоотделитель, коллектор очищенного газа, скруббер, коллектор осушенного газа, а также газовый вентилятор и каплеуловитель, в случае если смолоулавливающий аппарат не повышает давления газа. При низкой температуре выходящего

из генератора газа иногда, как и в случае установки перед смолоотделителем поверхностного холодильника, стояков-охладителей не применяют. Смолоотделители и скрубберы изредка устанавливают индивидуальные у каждого генератора.

Если температура газа при выходе из генератора настолько низка, что может начаться преждевременная конденсация влаги, обводняющей смолу или способствующей коррозии оборудования вследствие одновременного выделения уксусной кислоты (см. ниже), возможна установка за генератором газоподогревателей, в которых обычно сжигается часть газа (рис. 201).

2. Для каменного и бурого угля с малым содержанием влаги при генераторе без швельшахты установка может отличаться дополнительным применением до стояка-охладителя, в котором вымывается часть пыли и высококипящих смол, также сухого пылеуловителя (рис. 202)

Это не выявило преимуществ и повидимому имеет некоторый смысл при замене орошаемых водой стояков поверхностными холодильниками.

3. Для газа верхнего отъема из генератора со швельшахтой при каменном или буром угле с малым содержанием влаги — генератор, смолоотделитель, скруббер (и газовый вентилятор и каплеуловитель). При установке поверхностного охладителя до смолоотделителя необходимость пропускания швельгаза через скруббер может отпасть (рис. 203).

Об очистке газа из нижнего отъема и некоторой рискованности установки для использования физического тепла газа нижнего отъема котлов-утилизаторов сказано выше.

4. Для тонкой очистки газ дополнительно направляют во вторую ступень смолоотделения. В установке каплеуловителя за газовым вентилятором в этом случае нет необходимости.

Иногда в целях упрощения газогенераторного хозяйства устанавливают мокрую очистку газа без предварительного смолоулавливания.

Особенно часто это бывает в малых установках или в тех случаях, когда периодически приходится прибегать к осушке газа. Подобная очистка имеет место и в случаях аварий (при выключении смолоотделительных приспособлений).

Отделение смолы при подобной работе производится только в отстойниках для воды. Насадки скрубберов подвержены быстрому засорению.

Установки с очисткой смолистого газа без специальных смолоотделителей могут применяться или с индивидуальными очистными приспособлениями (генератор, стояк, скруббер) или с общими (генератор, стояк, коллектор, скруббер). В первом случае установка более громоздка и дорога, но дает возможность избежать чистки коллектора и связанного с этим выключения генераторов, что впрочем редко производится при надлежащем устройстве отдельных частей.

При необходимости достижения в подобных установках тонкой очистки газа охлажденный газ может быть подвергнут дополнительной очистке в специальном смолоотделителе — аппарате Тейсена или

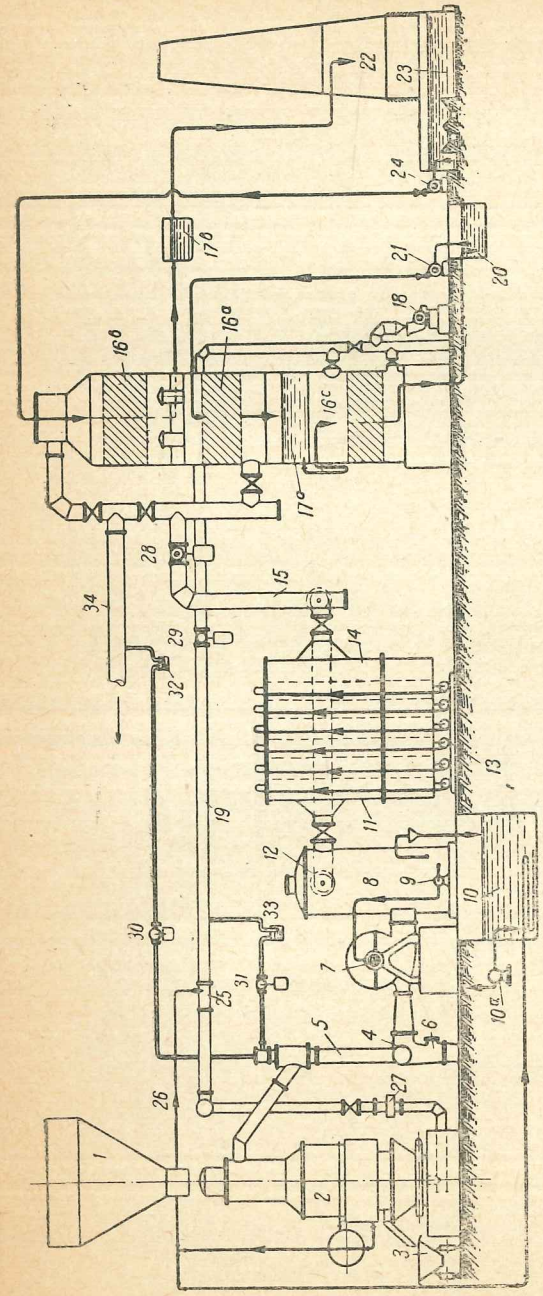


Рис. 201. Схема мокрой очистки смолистого газа с нейтрализатором уксусной кислоты:

1 — бункер, *2* — генератор, *3* — вагонетка для золы, *4* —коллектор, *5* — стояк, снабженный подогревательным (или охладительным) устройством, *6* — гидравлический затвор, *7* — смолоотделитель Тейсена, *8* - каплеуловитель' *9* — смоляной циркуляционный насос, *10* — смоляная яма, *10а* — насос для перекачки смолы в тару, *11* — нейтрализатор уксусной кислоты, *12* — обводный газопровод, *13* — циркуляционные насосы для щелочного раствора, *14* — камера для улавливания капель, *15* — газопровод к скрубберу, *16а* — ступень горячей воды, *16б* — ступень холодной воды, *16с* — воздухонасытительная ступень, *17а* —маслоотделитель для горячей воды, *17в* — маслоотделитель для холодной воды, *18* — воздушный вентилятор, *19* — воздухопровод к генераторам, *20* — яма для горячей воды, *21* — насос для горячей воды, *22* — градирня для воды холодного цикла, *23* — яма холодной воды, *24* — насос для холодной воды, *25* — смесительное сопло (дополнительный пар), *26* — подача пара от паровой магистрали, *27* — обратный клапан на воздухопроводе, *28* — регулятор количества газа, поддерживающий постоянное давление в коллекторе сырого газа, *29* — регулятор количества воздуха, *30* — регулятор количества газа, подаваемого к подогревательным устройствам, поддерживающий неизменным давление в газопроводе к подогревательным устройствам, *31* — регулятор количества воздуха, подаваемого к подогревательным устройствам, *32* и *33* — обратные гидравлические клапаны, *34* — газопровод к потребителю

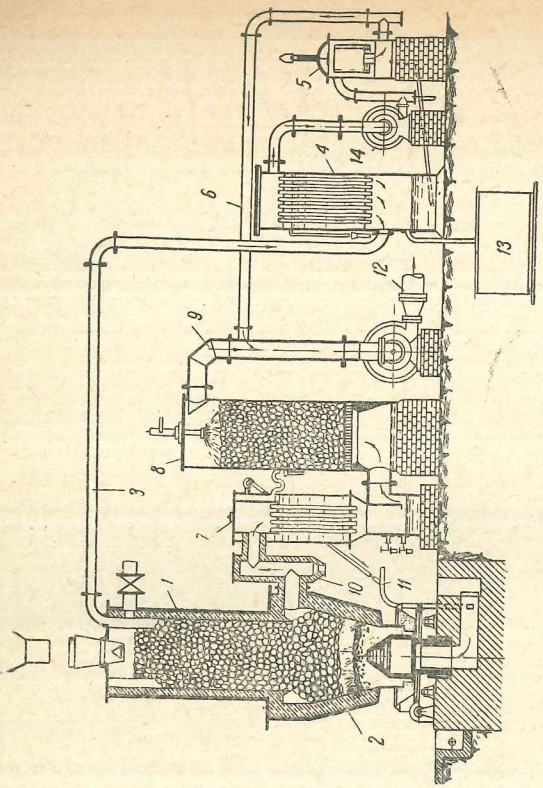


Рис. 203. Схема установки генератора со швельшахтой и двойным отъёмом газа:
1 — швельшахта, *2* — нижняя шахта, *3* — газопровод для газа верхнего отъема, *4* — поверхностный (трубчатый) холодильник, *5* — смолоотделитель, *6* — газопровод для очищенного газа верхнего отъема, *7* — трубчатый кожухотел, *8* — скруббер, *9* — газопровод очищенного газа, *10* — пылеуловитель, *11* — воздухопровод, *12* — газопровод смеси газов, *13* — сборник конденсата, *14* — газовый вентилятор

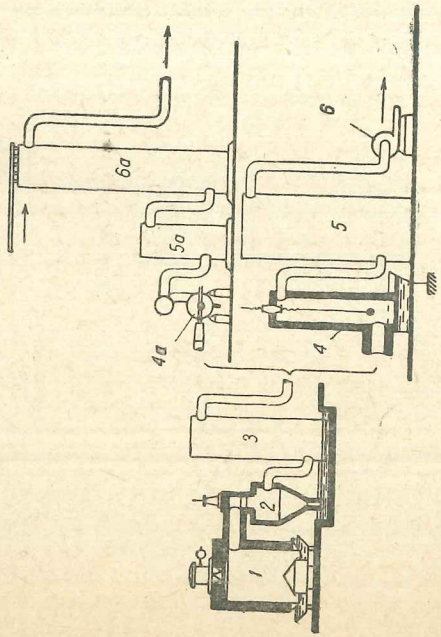


Рис. 202. Схема мокрой очистки смолистого газа с сухим пылеуловителем до смолоотделения:
1 — газогенератор, *2* — сухой пылеуловитель, *3* — предварительный поверхностный охладитель, *4* — электростатический смолоотделитель, *4а* — механический смолоотделитель, *5* — поверхностный холодильник, *5а* — каплеуловитель, *6* — вентилятор, *6а* — скруббер

электрофильтре, где осядут взвешенные в газе частицы пыли, смол и влаги.

Приведенные схемы относятся к установкам смешанного газа. При получении двойного водяного газа последний проходит гидравлический затвор, холодильники (обычно поверхностные) и смолоотделители.

Последовательность прохождения газа (обычно): гидравлический затвор, холодильник, вентилятор, смолоотделитель (или сначала смолоотделитель и потом вентилятор).

Каждый генератор снабжается самостоятельным оборудованием для очистки. Установки вентилятора при достаточном давлении пара или применении центробежных смолоотделителей не требуется. Получаемый газ направляется в газгольдер и из последнего непосредственно или с помощью соответствующих нагнетательных устройств к потребителю или на дальнейшую очистку.

В случае карбюрированного водяного или двойного водяного газа последний после прохода карбюратора попадает в гидравлический затвор и далее охлаждается в холодильниках. При большом содержании в газе после карбюратора смол он может быть также пропущен через смолоотделитель.

Физическое тепло газов после карбюратора иногда используется в трубчатых подогревателях, например для подогрева циркуляционного газа или пара.

В случае значительного уноса из генератора пыли до карбюратора устанавливается пылеуловитель.

Установка для очистки смолистого газа усложняется в случае наличия в газе и улавливания из него уксусной кислоты, а также в случае улавливания фенолов из газа, прошедшего смолоотделитель (см. раздел «Улавливание уксусной кислоты и фенолов»).

Двухступенчатая очистка газа

В случае одноступенчатой очистки газ поступает в сеть к потребителю охлажденным до 25—35° с содержанием некоторого количества смолистых веществ (1—1,5 *г*/*м*³). При движении этого газа по газопроводам и его дальнейшем охлаждении сконденсированные и вновь конденсирующиеся вещества выделяются. В некоторых случаях, как например при питании газом печей, оборудованных беспламенными горелками, или при дальней газоразводке, требуется более тонкая очистка газа. Для этого за первой ступенью очистки устанавливается вторая ступень очистки, обычно такого же типа, как и первая.

Газовый вентилятор в таких случаях располагается большей частью за первой ступенью очистки, т. е. в месте, где газ достаточно очищен и охлажден. Улавливаемые второй ступенью очистки легкие масла представляют ценный продукт. Степень очистки газа после второй ступени может достичь 0,02 *г* взвешенных частиц (смола и пыль) в 1 *м*³ газа.

На рис. 204 представлена установка с двухступенчатой очисткой[118]. Смола и легкие масла осаждаются из буроугольного генератор-

ного газа в двух ступенях. В первой ступени происходит отделение смолы из газа с температурой 90°, т. е. выше температуры насыщения. Содержание смолы уменьшается с 30 до 0,7 *г/м³*, причем получается практически безводная буроугольная смола с удельным весом 1,03.

После первой ступени газ охлаждается в холодильнике до 30—40°. Охлажденный и содержащий туманы масел газ попадает во вторую очистительную ступень, где он оставляет легкие масла, служащие топливом для двигателей и составляющие при сыром буром угле 10—18% и при брикетах — 20—25% от всего выделенного количества смолы. Из второй ступени газ выходит с положительным давлением в 10 *мм* вод. ст. при температуре 20°.

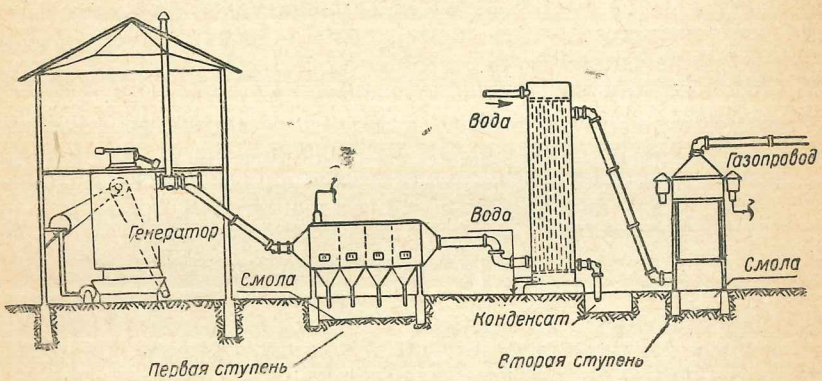


Рис. 204. Схема установки двух ступеней электрофильтров

По выходе из второй ступени генераторный газ содержит только 0,10—0,02 *г* легких масел в 1 *м³* газа.

После электрофильтра установлен вентилятор для нагнетания газа.

В других установках, снабженных двумя ступенями очистки, за первой ступенью очистки устанавливаются охладители и газовые вентиляторы и уже за последними — вторая ступень очистки. Предусматривается возможность обхода электрофильтров. Подобное расположение улучшает условия обслуживания, так как отпадает необходимость в поддержании высокого положительного давления для преодоления сопротивления двух систем электрофильтров.

Хранение смолы и отделение смолы от воды

Смолоуловительные приспособления снабжаются трубками, из которых смола по бетонным лоткам стекает в смоляные ямы.

Стояки, скрубберы, газопроводы и газовые вентиляторы также снабжаются трубками, через которые удаляются в смолоотстойные ямы по бетонным или деревянным лоткам промывные воды со смолистыми веществами. Наиболее тяжелые или всплывающие частицы смолы и пыли удаляются из затворов стояков и скрубберов вручную.

В соответствии с необходимостью придания лоткам уклона, ямы для смолы и воды располагаются в земле.

Смоляная яма, обычно бетонная, представляет собой круглый или прямоугольный резервуар, снабженный у дна железным змеевиком, обогреваемым паром и соединенным с конденсационным горшком. Подогрев требуется для разжижения смолы при откачке насосом. Кроме того подогрев способствует отделению смолы от воды, которая может быть отведена.

В газогенераторных установках при первичном улавливании вообще не получают безводной смолы. Вымываемая в стояке-охладителе смола сильно обводнена; смола, выделяющаяся в смолоуловительных приспособлениях, содержит некоторое количество влаги в растворенном виде: малое — при работе с температурой газа выше точки росы и значительное — при температуре ниже точки росы; смолистые вещества, вымываемые водой в скрубберах, смешаны с большим количеством воды.

Для отделения смолы, полученной при сухой перегонке бурого угля, от подсмольной воды иногда применяют железные прямоугольные отстойники длиной около 5 *м*, шириной в 1,25 *м* и высотой в 1,5 *м*. Вода со смолой поступает в отстойник по трубе, наполовину погруженной в жидкость. Отстойник снабжен змеевиком для подогрева. Отстоявшаяся вода поступает в сборник для окончательной очистки и выделения уносимой смолы. Отстоявшаяся смола направляется во второй отстойник, где вновь отстаивается и после этого поступает в сборник. Отстойники снабжаются у дна спускным краном для выпуска всей жидкости на случай чистки. Отстойники всегда заполнены до уровня сливной трубы; в сборнике же имеется поплавок указывающий уровень смолы. Спускаемая вода для удержания остатков масел проходит большие отстойные бассейны с коксовыми фильтрами.

На дне смоляных ям постепенно образуется осадок густой смолы, которая может закупорить трубы и насосы. Этот слой или вычерпывают или откачивают после сильного разогрева.

Обычно предусматривают резервные смоляные ямы и отстойники. На случай невозможности своевременного получения тары для смолы предусматривают аварийные смолохранилища, представляющие собой большие бетонные ямы.

Получаемые на генераторных станциях воды, содержащие смолистые вещества, проходят с малой скоростью смолоотстойные ямы, снабженные перегородками, в которых предусматривается возможность отвода смол, более легких и более тяжелых (если таковые имеются), чем вода, и легких масел. Для отвода более тяжелых смол дно ям делается с уклоном; стекающая смола собирается в приямке, из которого откачивается насосом.

В качестве смолоотстойных ям иногда применяют прямоугольные ямы, снабженные вертикальными перегородками, в которых вода постепенно протекает через отверстия, имеющиеся в перегородках, образующиеся отделения и отстоявшаяся и всплывающая смола может быть удалена. Иногда применяют круглые ямы с внутренними кольцевыми перегородками, не доходящими до дна (рис. 200). Вода по лотку поступает во внутренний цилиндр, спускается вниз и выходит наверх, где и отводится. Наиболее легкие всплывающие частицы

смол отводятся в смоляные ямы; наиболее тяжелые частицы смол опускаются на дно и собираются в приямке для тяжелой смолы. Продолжительность отстоя воды от смол принимают в среднем 1—3 часа. Очищенная вода поступает в резервуар горячей воды с перегородками, пропускающими воду снизу и удерживающими более легкие масла.

Из резервуара горячей воды вода поступает на градирню для охлаждения. Отстоявшиеся масла лотком отводятся в специальную яму, из которой они могут быть удалены.

Смоляные ямы, в которых происходит дополнительный отстой воды, должны подогреваться для лучшего отделения смолы от воды. Между смолой и водой образуется слой эмульсии, обезвоживание которой возможно лишь при подогреве и отсутствии в смоле пыли, являющейся эмульгатором и образующей адсорбционную оболочку на границе раздела фаз.

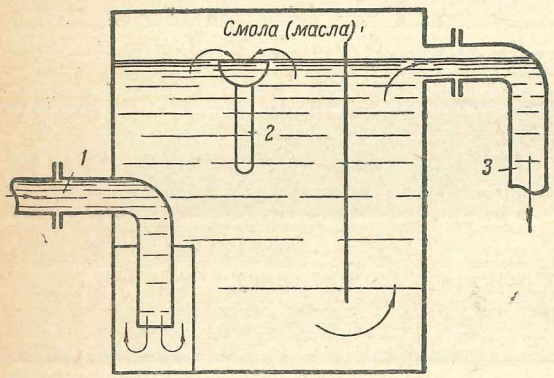


Рис. 205. Отстойник для масел

При охлаждении двойного водяного карбюрированного газа выделяются оставшиеся в газе смолы и нерасщепленное масло, смешанные с тонкой сажей — продуктом разложения углеводородов. Этот конденсат образует с водой, особенно в гидравлическом затворе, стойкую эмульсию, содержащую до 75% воды. Во избежание образования эмульсий в гидравлических затворах поддерживают высокую температуру воды; избегают образования смол из карбюрационного масла путем поддержания в карбюраторе достаточно высоких температур; кроме того собирают отдельно смолы из гидравлического затвора, холодильника и смолоотделителя.

В случае засорения смолы пылью полное обезвоживание смолы затруднительно; сильный нагрев смолы в этом случае оказывает незначительное влияние на ее обезвоживания.

При тяжелой каменноугольной смоле вода отстаивается вверху, а смола собирается в нижней части отстойника.

Иногда газ после отделения смолы подвергают многократной промывке в разных аппаратах. Такой случай может быть при выделении помимо смолы промывными жидкостями уксусной кислоты и фенолов или при охлаждении газа ступенями (трехступенчатый скруббер A. V. G.). Получающаяся промывная жидкость содержит легкие масляные фракции смол, хорошо и быстро отстаивающиеся без всякого подогрева.

Отстойник для масел (который может быть небольшого размера), применяющийся в трехступенчатом скруббере A. V. G., представлен

на рис. 205. Вода притекает через трубку *1*, перетекает из одного отделения отстойника в другое, и при этом масла всплывают и удаляются через слив *2*. Очищенная вода удаляется трубопроводом *3*. На дне смолоотстойных резервуаров со временем образуется осадок из ила, возможность спуска которого следует предусматривать.

Отделение смолы от воды с помощью центрифуг

Для упрощения и удешевления работы установки для разгонки смолы, содержащей некоторое количество влаги, смола может быть

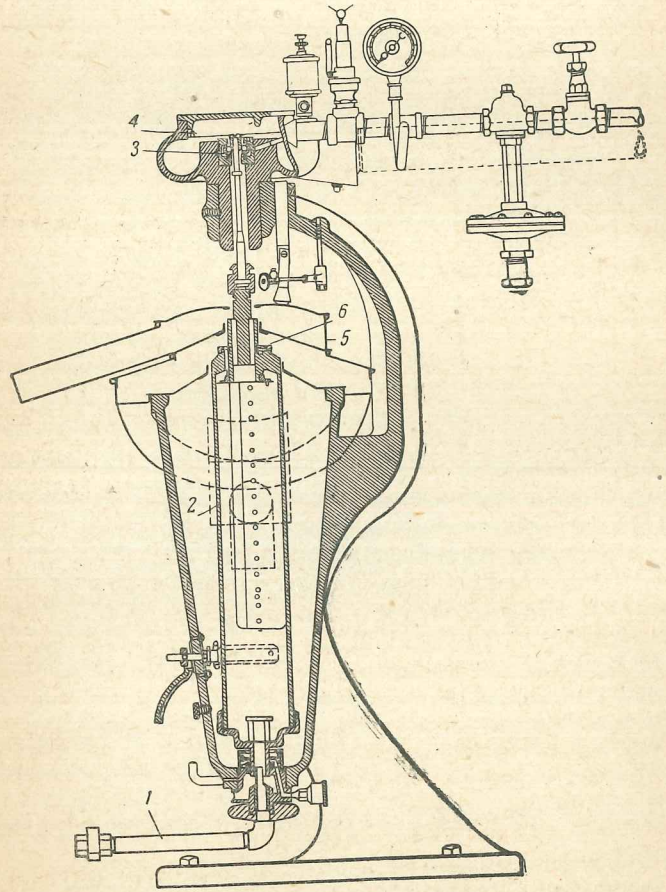


Рис. 206. Центрифуга

в весьма значительной степени обезвожена путем применения центрифуг.

На рис. 206 представлена центрифуга фирмы «Shorples Speciality Gompany, U. S. A.» [120], с успехом применявшаяся для обезвоживания смолы, полученной из газа Монда.

Центрифуга состоит из вращающегося резервуара *2*, подвешенного вертикально на шариковом подшипнике *3* и соединенного с паровой турбинкой *4*, приводящей во вращение резервуар со скоростью в 17 000 об/мин. Смола подводится трубопроводом *1*.

При вращении резервуара *2* под влиянием центробежной силы тяжелая смола отделяется от воды, образуя смоляной цилиндр вокруг водяного. Вода выпускается в камеру *5*, а смола — в камеру *6*.

Отделение смолы с удельным весом 1,05 от воды при начальном содержании воды в 35% происходит в несколько минут. Получающаяся смола содержит 1—2% влаги.

Очистка сточных вод

В современных станциях, снабженных аппаратами для очистки смолистого газа, промывная вода в целях экономии ее и уменьшения количества спускаемых вод обычно циркулирует. В скрубберах часть воды, содержащейся в газе, конденсируется, а на градирне или в брызгалах бассейна часть воды испаряется. Если количество конденсирующейся воды превышает количество испаряющейся (а при древесине, торфе и влажном буром угле это именно так), то постоянно некоторое количество воды спускается из пределов газогенераторной станции. Однако даже в случае, если излишков воды в циркуляционной системе нет, воду следует постепенно или периодически спускать ввиду ее загрязнения, возможности засорения системы и накопления веществ, могущих корродировать систему.

Больным вопросом для современных станций является очистка спускаемых промывных вод, содержащих вымываемые из газов битуминозных топлив фенолы. Промывная вода обычно спускается в ближайшие водоемы — пруды, озера и реки и постепенно отравляет водоемы, делает воду непригодной для питья, умерщвляет рыбу и т. д. Примером может служить имеющее место в Германии заражение такой большой реки, как Рейн, вследствие спуска в нее промывных вод коксовальных заводов и генераторных станций.

Борьба со сточными водами ведется как путем их очистки, так и путем уменьшения их количества.

Уменьшение количества сточных вод достигается не только упомянутым устройством замкнутого цикла, но и подсушкой топлива и использованием конденсата для увлажнения дутья. При влажности бурого угля в 20—22% можно избежать спуска конденсата, что не исключает возможности улавливания из этих вод фенолов.

Методы очистки сточных вод газогенераторных установок подразделяются на регенеративные с улавливанием фенолов в качестве побочного продукта и деструктивные, сопровождающиеся полным разложением фенолов. Регенеративные методы не обеспечивают достаточной очистки воды и могут комбинироваться с деструктивными.

Обычная для сточных вод биологическая очистка не может быть применена, так как значительное содержание фенолов убивает бактерии.

Разработан метод биологической очистки фенольной воды слабой концентрации, так как она может быть прекрасной средой для особого вида бактерий. Трудность применения этого способа заключается в необходимости доведения концентрации фенолов до норм, при которых возможно действие бактерий. Простое разбавление водой до желаемой концентрации потребовало бы бассейнов колоссальных размеров и обошлось бы слишком дорого. Возможно комбинирование способов химической и биологической очистки сточных вод. Обработкой сточной воды известковым молоком можно часть фенолов превратить в кальциевые феноляты и перевести в легко отстаивающиеся осадки. Остатки же фенолов будут находиться в концентрации, допускающей биологическую очистку.

Возможно применение экстракционного метода очистки, заключающегося в обработке сточных вод органическими растворителями — маслами минерального, животного и растительного происхождения, с доведением содержания фенолов в воде до предела, допускающего или спуск на сторону или очистку обычно применяемыми способами [1].

Возможна продувка подсмольных вод перегретым паром или газами (метод Копперса), выдувающими фенолы.

Уменьшения содержания фенолов в сточных водах возможно добиться путем продувания воздухом разбавленных растворов фенолов с прибавлением катализаторов. Окисляются воздухом преимущественно многоатомные фенолы. При окислении фенолы превращаются в менее растворимые соединения, которые могут быть легко отделены.

Хлорирование фенольных вод до сих пор не применяется ввиду того, что образующиеся хлоропроизводные фенолов обладают чрезвычайно неприятным запахом, препятствующим применению воды.

Возможно хорошее улавливание фенолов, даже в случаях слабых растворов, болотной рудой. Последняя поглощает также аммиак, сероводород и другие соединения.

Выпаривание сточных вод до небольшого объема с последующим спуском остатка во всасывающие ямы оказалось невыгодным вследствие большого расхода топлива и сильного заражения возуха.

Прекрасные результаты дает применение активированного угля как поглотителя фенолов. При очистке сточных вод активированный уголь засоряется и быстро перестает работать, кроме того этот способ дорог [195, 196, 197]. В случае регенерации угля и улавливания фенолов способ может быть рентабельным.

7. ВЫДЕЛЕНИЕ ИЗ ГАЗА УКСУСНОЙ КИСЛОТЫ И ФЕНОЛОВ

При сухой перегонке древесины и торфа происходит их разложение с выделением в числе прочих продуктов уксусной кислоты и ее гомологов.

Выделение уксусной кислоты из газа преследует цель улавливания ее как ценного продукта и устранения опасности разъедания металлической аппаратуры. Следует отметить, что особенный толчок к улавливанию уксусной кислоты в СССР дало интенсивное разъеда-

[1] См. ниже «Улавливание уксусной кислоты и фенолов».

ние газопроводов и аппаратов Тейсена на торфяной генераторной установке в Гусь-Хрустальном, вызвавшее смену через год-полтора после пуска станции газопроводов и почти ежемесячную смену роторов аппаратов Тейсена.

Опыт работы новейших торфяных газогенераторных станций указывает на то, что в случае достаточно высокого содержания в газе аммиака подсмольные воды имеют не кислую, а щелочную реакцию, и разъедания металлических частей не происходит. Высокое содержание аммиака в газе может быть при работе на низинных торфах, содержащих много азота.

Генераторный газ по выходе из смолоуловительных устройств обычно содержит в парообразном состоянии значительное количество смолистых веществ, большую часть которых составляют фенолы, преимущественно водорастворимые. Фенолы вымываются из газа водой в скрубберах. Содержащая фенолы вода отравляет водоемы и поэтому до спуска должна быть очищена.

Вместе тем фенолы представляют собой довольно ценные химические продукты, которые могут быть использованы в некоторых производствах. Техническая мысль в последние годы работает как над способами рационального обезвреживания вод, так и над способами утилизации и улавливания фенолов, содержащихся в генераторном газе.

Выходы уксусной кислоты составляют: для лиственных пород древесины — примерно 7% и для хвойных — 3—3,5% от веса сухой беззольной древесины [198].

Для торфа, особенно низинного, выхода уксусной кислоты и фенолов могут составлять значительную величину. Верховой торф со степенью разложения в 5—65% дал следующие выхода [139] (пределы на сухой торф): уксусной кислоты — 0,75—1,78%, фенолов летучих с водяным паром, — 0,20—0,58%, фенолов нелетучих с водяным паром, — 0,06—0,18%.

Выхода фенолов при газификации особенно значительны в генераторах со швельшахтами.

Улавливание уксусной кислоты при сухой перегонке древесины

Улавливание уксусной кислоты издавна практикуется при сухой перегонке древесины и заключается в переработке подсмольной воды путем дестилляции, обработке известковым молоком и выпарке раствора уксусно-кальциевого порошка.

Средние выхода серого порошка на заводах сухой перегонки дерева, считая на 1 $м^3$ дров с влажностью в 25%, составляют округленно: для березы — 20 *кг*, для осины — 15 *кг* и для хвои — 8 *кг*. При среднем весе 1 $м^3$ абсолютно сухой березы в 350 *кг*, осины и хвойных пород — в 270 *кг* средний выход порошка на сухую древесину составляет: для березы и осины — 5,6% и для хвойных пород 3%. Принимая крепость порошка равной 75%, получим выход сухого порошка из лиственных пород равным 0,075 *кг* и из хвойных — 0,04 *кг* на 1 *кг* обсолютно сухой древесины (25%-ного раствора — вчетверо больше) [200].

Открытие и развитие синтетических методов получения уксусной кислоты побудило промышленность разработать более рациональные методы улавливания уксусной кислоты, к числу которых относится метод Сюида и др.

Метод Сюида заключается в перегонке подсмольной воды, освобожденной от смолы и содержащей уксусную кислоту, обработке полученных паров высококипящей фракцией (240—320°) древесной смолы, поглощающей уксусную кислоту, и выделении из масла уксусной кислоты. При этом способе уксусная кислота получается высокой концентрации, а расход пара не велик.

В других новых способах выделение уксусной кислоты идет из водных растворов.

Улавливание уксусной кислоты и фенолов в газогенераторных установках

Иностранными фирмами, поставлявшими в СССР газогенераторные установки, во избежание разъедания газопроводов были применены два мероприятия: подогрев газа при выходе из генератора с помощью специальных горелок в целях предотвращения преждевременной конденсации влаги и с нею уксусной кислоты и нейтрализация уксусной кислоты известью.

В качестве нейтрализаторов, устанавливаемых за смолоотделителями Тейсена, заграничными фирмами применены промыватели Штредера и Бергфельда.

Промыватель Штредера описан выше, что же касается промывателя Бергфельда, то он (рис. 201) представляет собой камеру, в которой газ движется горизонтально, а раствор стекает сверху по хордовой насадке. Промыватель разделен на несколько отделений, снабженных самостоятельными насосами для циркуляции раствора. Свежий раствор подается со стороны выхода газа в первую камеру, где газ почти освобожден от уксусной кислоты; соответствующее количество раствора перетекает в последующие камеры и отводится из последней камеры. Устройство должно давать возможность хорошо использовать раствор и хорошо очистить газ.

Развитие методов и способов улавливания уксусной кислоты в газогенераторных установках в СССР отчасти пошло по тому же пути, что и в промышленности сухой перегонки дерева.

Согласно исследуемым и выполненным предложениям, процесс очистки генераторного газа, содержащего смолистые вещества и уксусную кислоту, подразделяется на три стадии: очистку газа от смолы, выделение уксусной кислоты и фенолов и осушку газа.

В осуществленной в СССР в 1929 г. дровяной газогенераторной установке на стекольном заводе «Белый Бычок» скрубберы, расположенные за электрофильтрами, должны были орошаться достаточно концентрированным раствором уксусного порошка. Раствор должен был и охлаждать газ и улавливать уксусную кислоту. Теплый и кислый раствор должен был обрабатываться известью для перевода кислоты в уксусно-кальциевую соль, после чего — направляться на градирню [200].

По ряду причин установка на «Белом Бычке» пущена лишь в последнее время.

На другом заводе подобная установка работает уже длительное время.

Предложенная схема показана на рис. 207. Она состоит из двух самостоятельных циклов — конденсационно-поглотительного и конденсационно-промывного. Во избежание засорения скрубберы сделаны без насадок. Изменяя температуру газа, выходящего из скрубберов, можно изменять количество конденсирующейся в них воды.

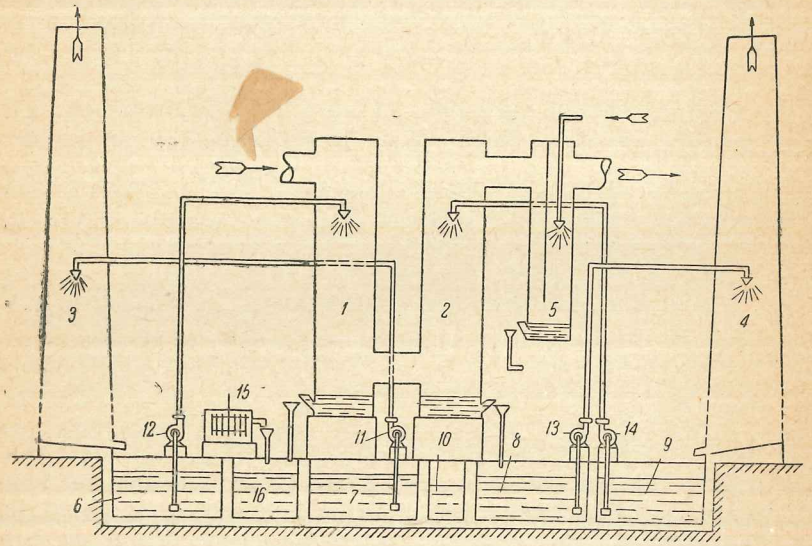


Рис. 207. Схема очистки газа с улавливанием уксусной кислоты

Схема процесса следующая: влажный газ, пройдя электрофильтр, поступает с температурой 80—90° в поглотительный скруббер *1*, где орошается кислотопоглощающим и охлаждающим раствором, после чего проходит промывной скруббер *2*, где орошается чистой водой, поглощающей увлеченные из первого скруббера частицы раствора. Вода второго скруббера понемногу обогащается порошком. Для охлаждения теплого раствора порошка из скрубберов *1* и *2* служат градирни *3* и *4*. Отходящий из скруббера *2* газ с температурой 45—60° подвергается окончательной промывке и охлаждению чистой водой в скруббере *5*. Для хранения растворов порошка и воды служат сборники *6*, *7*, *8* и *9*. Резервуар *10* служит для сбора масел, всплывающих в указанных сборниках. Для подачи воды в градирни и скрубберы служат насосы *11*, *12*, *13* и *14*. Мешалка *15* служит для приготовления молока; из нее известковая суспензия подается в смеситель *16*, где смешивается с теплым раствором порошка, выходящим из поглотительного скруббера.

Для нейтрализации уксусной кислоты в кальциевую соль практически необходимо 32% активной окиси кальция, готовящейся обычно в виде 15%-ного известкового молока.

Уксусная кислота взаимодействует с гидратом окиси кальция по реакции:

$$2CH_3COOH + Ca(OH)_2 = (CH_3COO)_2Ca + 2H_2O.$$

На рисунке не показан фильтрпресс с насосом, служащий для выведения из системы известковых солей фенолов и других осаждающихся из раствора твердых осадков.

Газ перед поступлением в скруббер *5* дважды подвергается промывке, и следовательно в промывные воды скруббера *5* могут перейти лишь ничтожные количества кислот, фенолов и других примесей; поэтому эти воды можно рассматривать как безвредные и могущие быть спущенными в естественные водостоки. Влага, конденсирующаяся в скрубберах *1* и *2*, удаляется в виде пара на градирнях, а кислоты и главная масса парообразных фенолов должны поглощаться раствором порошка в скруббере *1*. Для удаления из системы фенолов в форме известковых солей поддерживается определенная щелочность раствора порошка и производится откачка через фильтр-пресс выделяющихся осадков известково-фенольных солей. Для отделения не связываемых щелочью веществ — нейтральных масел, скипидара и пр. — должна быть обеспечена достаточно емкая и рациональная система отстойников *6* — *7*, *8* — *9* с возможностью удаления из них как легкого, так и тяжелого отстоя. Работа была запроектирована в расчете на получение концентрированных, т. е. 20—25%-ных растворов порошка, подлежащих в дальнейшем упарке.

Уксусная кислота и ее ближайший гомолог — муравьиная кислота — легко поглощаются как чистой водой, так и растворами солей. Фенолы и высшие гомологи уксусной кисоты мало растворимы в концентрированных растворах порошка и способны к образованию рыхлых нерастворимых осадков известковых солей. Образование их может иметь место при достижении раствором определенной степени щелочности, концентрации и температуры. Особенно быстрое выделение этих осадков происходит при температурах выше 70—80° и при достаточной щелочности раствора. В кислой среде эти осадки разлагаются, выделяя обратно свободные фенолы или высшие гомологи, причем часть их переходит в раствор, а часть остается в суспендированном состоянии в зависимости от температуры, концентрации и кислотности раствора.

Побочные химические реакции, происходящие в процессе поглощения, осложняются воздействием воздуха в градирнях на высшие фенолы, способные окисляться, с образованием смолообразных продуктов. Вместе с тем при заметно кислой реакции поглощающих растворов неизбежен унос части кислоты воздухом при прохождении раствора через градирню.

Наиболее подходящей средой для работы подобной установки является слабощелочная, обеспечивающая полноту и быстроту поглощения кислоты в первом скруббере и ослабление уноса кислоты на градирне. Образующиеся осадки фенольно-известковых солей должны своевременно удаляться из системы во избежание засорения трубопроводов и порошка. Для скорейшего образования этих солей,

чему способствует повышение температуры, известь вводится в раствор, вытекающий из первого скруббера.

На основании произведенных расчетов для температуры дровяного газа, при выходе из генератора равной 100—150°, влажности дров в 25 и 65% и использования для приготовления известкового молока воды из промывного скруббера *2* проф. Деревягин приходит к выводу, что вопрос о возможности поддержания в системе любой постоянной заданной концентрации раствора порошка в очень широких пределах практических колебаний влажности следует считать принципиально разрешенным. С точки зрения качественной стороны условий поглощения кислоты из газа, влияния побочных реакций на процесс в целом и на качество получаемого порошка вопрос является более или менее ясным. Для получения количественных показателей требуются специальные исследования.

На одном из заводов была сделана увенчавшаяся успехом попытка улавливания уксусной кислоты вместе со смолой и частью влаги газа. Для этой цели при выходе из газогенератора поддерживалась низкая температура газа, в результате чего в электрофильтре, установленном за коллектором сырого газа, выделялись смолистые вещества и уксусная кислота почти целиком. Такой метод улавливания дает возможность получать высококонцентрированную уксусную кислоту.

Из числа других методов улавливания из генераторного газа уксусной кислоты и фенолов и их гомологов следует отметить способы, предложенные Ленинградским отделением Газогенераторстроя и Инсторфом.

В этих способах процесс, так же как и в предыдущем, разделяется на три стадии: отделение смолы, выделение уксусной кислоты и фенолов и осушка газа. Способы предусматривают также улавливание аммиака в случае наличия его в газе и предложены в виде двух вариантов — масляного и водяного — в зависимости от того, что будет применяться в качестве абсорбента: масло или вода.

Масляный метод заключается в промывке газа веществами, обладающими, в случае наличия в газе одновременно и фенолов и уксусной кислоты, избирательной способностью поглощения.

Согласно опытам, проведенным Харьковским углехимическим институтом по извлечению фенолов бензохинолином при однократной промывке фенольных вод, извлечение фенолов составляет примерно 80%. При повторной промывке извлечение фенолов повышается. На хорошее улавливание фенолов торфяными маслами указывают опыты, проведенные Инсторфом.

Применение в качестве абсорбента или экстрагента погонов смол, несмотря на большую экстракционную способность бензохинолина, является для газогенераторных станций более благоприятным, так как дает им возможность использовать в технологическом процессе более дешевые продукты и не быть зависимыми от влияния ситуации рынка.

Примененные Инсторфом легкие масла обладают избирательной способностью: поглощая фенол, они не поглощают жирных кислот, в том числе и уксусной.

Свойствами избирательной абсорбции по отношению к фенолам и уксусной кислоте обладают также в известной степени масла, отогнанные из древесной смолы.

Процесс поглощения из газа фенолов и уксусной кислоты маслами ведут при температурах выше температуры насыщения газа парами воды во избежание их конденсации.

Хорошим поглотителем уксусной кислоты, фенолов и аммиака является вода. Улавливание уксусной кислоты и фенолов водой ведется при температуре несколько ниже точки росы, и при этом они переходят почти целиком из газа в водный раствор.

В случае абсорбции фенолов и уксусной кисоты маслами выделение масел происходит путем обработки их — разгонки кислотного масла и обработки фенольного масла щелочью.

При поглощении фенолов и уксусной кислоты водой последняя подвергается последующей обработке. Путем смешения с экстракционным маслом вода обесфеноливается, после чего она обрабатывается известью, и получившийся раствор уксуснокислого порошка подвергается упарке. Возможна и иная обработка воды (см. ниже).

Предложенные масляный и водяной методы, находящиеся в стадии опытной проверки, не имеют еще в настоящее время достаточного теоретического и практического обоснования. Неопределенным является количество выделяющихся со смолой уксусной кислоты и аммиака. Недостаточно изучены масла, которые должны обладать избирательной способностью поглощения. Масла при улавливании фенолов одновременно с последними могут поглощать некоторые количества уксусной кислоты. В случае если уксусная кислота должна поглощаться фенольными маслами после поглощения из газа фенолов, газовая атмосфера может обогатиться фенолами из кислотопоглощающего масла, и эффект обесфеноливания в первом абсорбере будет ослаблен за счет обработки газа фенолами во втором абсорбере.

Подобное препятствие может заставить вести процесс с первоначальным улавливанием уксусной кислоты и последующим улавливанием фенолов или установить третий абсорбер для повторного улавливания фенолов.

Недостаточно ясными также являются вопросы о поглощении маслами аммонийных соединений, о достижимых концентрациях кислоты в масле, о рациональном методе извлечения кислоты из масла и т. д.

Ряд указанных в разделе «Очистка сточных вод» методов очистки сточных вод от фенолов допускает улавливание фенолов и их гомологов, содержание которых в промывной воде сточных вод составляет при работе с замкнутым водяным циклом 7,5—8 *г/л*.

Схема наиболее старого метода — экстракции органическими растворителями — следующая. Подсмольная вода очищается в фильтрах от фусов и пыли, подогревается, проходит скруббер с насадкой и растворителем для смолы, обычно бензолом, после чего поступает в следующий скруббер на обезфеноливание. Предварительная очистка от смолы необходима во избежание загрязнения последующих скрубберов и образования стойких эмульсий. Бензол или другой растворитель обрабатывается раствором едкой щелочи, после чего

вновь подается в цикл; полученный же фенолят или перерабатывается на чистый фенол или реализуется в качестве продукции.

Метод сравнительно прост, позволяет использовать фенолы в качестве побочного продукта, сравнительно хорошо очищает воды от фенолов. Недостатком его является недостаточная очистка вод от отдельных вредных веществ (H_2S, роданистые соединения) и большая потеря бензола вследствие значительной растворимости в воде.

По методу Копперса фенолы и другие органические соединения при 100° и выше отгоняются водяным паром, и в дальнейшем их пары улавливаются щелочью. [illegible] феноливание достигается хорошее, расход пара значителен.

По методу очистки путем адсорбции активированным углем с последующей регенерацией угля схема работы следующая. Подсмольная вода очищается на фильтрах Кенига от пыли, фусов и смолы, после чего в адсорберах с активированным углем очищается от фенолов и других органических соединений. Регенерация насадки производится бензолом, экстрагирующим фенолы, смолы и другие органические соединения. Путем продувки паром насадка освобождается от остатков бензола и может быть вновь использована. Подобный способ работы повидимому устраняет основной недостаток этого метода, дающего прекрасную очистку, — высокую стоимость.

Из других адсорбентов, могущих быть использованными для удаления фенолов, возможно отметить болотную руду, бурый уголь и торф.

Обработка сточных вод болотной рудой дает вначале высокий, но заметно падающий коэфициент адсорбции. Руда легко регенерируется путем продувки паром или воздухом.

Адсорбция фенолов бурым углем и торфом незначительна.

Очистка сточных вод хлором дает смолообразные продукты. Необходимость очистки вод активированным углем для уничтожения отвратительного запаха, придаваемого пара-, мета- и ортохлорфенолами, получающимися при обработке хлором, удорожающая и осложняющая установку, является основным недостатком способа.

Полученные при окислении фенолов в сточных водах искусственные смолы являются ценными продуктами для лакокрасочной промышленности.

В соответствии с результатами последних исследований в части очистки сточных вод станций, работающих на торфе и древесине, рекомендуется: при отсутствии специальных фенольных цехов применять метод известкования; при наличии фенольных цехов—обработку концентрированных сточных вод вести методом обменного разложения уксуснокислого натрия с получением аммиака и фенолов; окончательную очистку вод вести методом биологическим или сорбции активированным углем.

При очистке сточных вод буроугольных станций рекомендуется применять или метод очистки сорбцией активированным углем (с регенерацией бензолом) или метод экстракции (в частности трикрезилфосфатом) с доочисткой вод.

Предупреждение выделения укусной кислоты

В соответствии со своим содержанием в генераторном газе уксусная кислота должна была бы иметь очень низкую температуру точки росы; однако выделение ее имеет место одновременно с выделением влаги из газа, так как она, как жадно соединяющаяся с водой, находится в форме паров слабого раствора уксусной кислоты и имеет точку росы, близкую к точке росы чистой воды. Корродирующее действие уксусной кислоты наблюдается при ее нахождении в жидком виде.

Во избежание выделения влаги, а следовательно и уксусной кислоты, что связано с коррозией оборудования и потерей кислоты, газ, если он имеет низкую температуру, подогревают, для чего применяют специальные горелки. Таким путем к аппаратуре, предназначенной для улавливания уксусной кислоты, подводят газ с температурой выше точки росы.

Этим же устройством достигается получение и менее обводненной смолы.

Подогревательное устройство для газа представлено на рис. 201. Горелка расположена на стояке за генератором и питается газом от коллектора очищенного газа. Воздух для горения подается от вентилятора, обслуживающего генераторы. Воздухо- и газопроводы снабжены регуляторами давления, увеличизающими открытие дросселей при падении давления. На случай сильного падения давления газа (с чем связана возможность попадания в газопровод воздуха) задвижки газо- и воздухоподводящих ветвей к горелкам связаны с противовесами, соединенными тросом с лебедкой, отпускающей трос (с помощью собачки и храпового колеса) при падении давления в коллекторе очищенного газа. При спуске троса противовесы закрывают задвижки, и следовательно исключается возможность попадания в газопровод воздуха.

Газо- и воздухопроводы, питающие горелки, снабжены также обратными гидравлическими клапанами, предупреждающими возможность при падении давления попадания в них газов из горелки.

8. УЛАВЛИВАНИЕ АММИАКА

Азот топлива переходит в генераторный газ в виде азота и аммиака. При медленном нагревании топлива и особенно в присутствии больших количеств водяного пара получаются увеличенные выходы аммиака (подробнее см. главу V).

Аммиак хорошо растворим в воде, особенно при низких температурах, и в весьма значительной степени растворяется в воде скрубберов. При наличии в газе уксусной кислоты или сероводорода аммиак может быть уловлен совместно с ними.

Генераторный газ содержит обычно мало аммиака — от 0,5 до 1,7 $г/м^3$, газ Монда — 2,5—3,5 $г/м^3$.

При горении газов, содержащих аммиак, образуются окислы азота, вредные для здоровья и образующие разрушающе действующую азотную кислоту.

Улавливание аммиака однако обычно связано с получением ценного побочного продукта.

Монд первый удачно осуществил устройство генератора с улавливанием аммиака и использованием газа для целей отопления [62]. Высокого выхода аммиака он достигал добавкой пара в размере 900 *г* на 1 *м*³ воздуха, а высокого коэфициента полезного действия — в результате использования физического тепла газа для подогрева дутья и получения пара. Указанная выше добавка пара соответствует подаче пара в размере 2—2,5 *кг* на 1 *кг* каменного угля и 1—1,5 *кг* на 1 *кг* бурого угля. Подача такого большого количества пара допустима лишь при подогреве дутья.

На рис. 208 представлена установка Монда для газификации 1000 *кг* угля в час. Первичный воздух в количестве 3000 *кг* в башне *11* насыщается 1000 *кг* водяного пара и подогревается до 70°. В воздухопроводе *12* по пути к подогревателю *2* к воздуху соплом *9* доба-

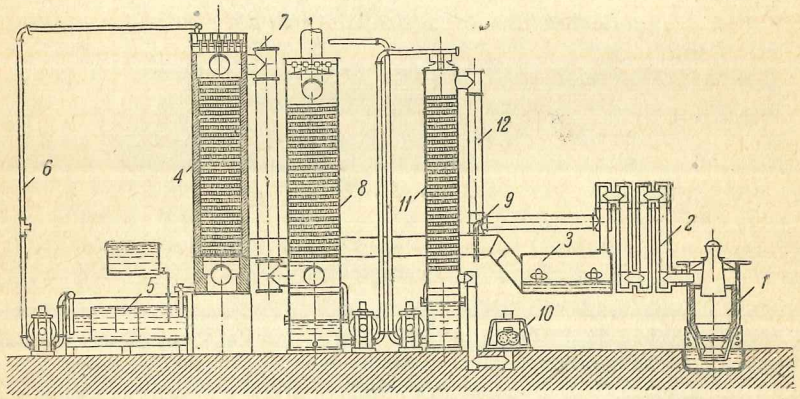


Рис. 208. Установка Монда с улавливанием аммиака

вляется еще 1500 *кг* пара из котла, и температура смеси повышается до 85°. В подогревателе *2* паровоздушная смесь подогревается генераторным газом до 350° и по пути к генератору обтекает стенки последнего. Смесь образует в генераторе 4500 *м*³ газа, причем 2000 *кг* пара проходят генератор *1* неразложенными. Газ выходит из генератора с температурой 450°, охлаждается в противоточном подогревателе *2* до 280° и входит в промыватель *3*, в котором вода разбрызгивается посредством двух валов с лопастями. Здесь газ охлаждается до 90° и воспринимает 750 *кг* пара, содержа таким образом 2750 *кг* пара и не будучи насыщенным.

В этом состоянии газ входит в свинцовую кислотную башню *4*, где орошается смесью раствора сернокислого аммония и серной кислоты, подаваемой трубопроводом *6*. Из газа в этой башне не выделяется влага, так как он не насыщен, и при взаимодействии аммиака с серной кислотой выделяется тепло. Раствор сульфата аммония стекает в хранилище *5* с температурой 80°, где он нейтрализуется добавкой кислоты и из него выкристаллизовывается сульфат аммония. Газ по газопроводу *7* удаляется из кислотной башни с температурой

80° в холодильную башню *8*, где он охлаждается до 65° и из него выделяется 1500 *кг* влаги. Окончательное охлаждение газа производится в скруббере (на рисунке не показанном). Охлаждающая вода подается с температурой 50° в башню *8*, нагревается до 75° и перекачивается в башню *11*, где она орошает и насыщает воздух, подаваемый вентилятором *10*. Охлажденная до 50° вода вновь возвращается в холодильную башню. Охлажденный газ проходит сухой опилочный фильтр и идет к местам потребления.

В других установках газ из теплообменника поступает в смолоотделитель и далее в горизонтальный свинцовый аппарат для улавливания аммиака. Установка горизонтального аппарата позволяет избежать дорогой установки башни со специальной насадкой и насосов. Расход энергии при этом не изменяется ввиду необходимости приведения в движение крыльчатого распылителя.

Франк-Каро в схеме Монда были дополнительно установлены специально отапливаемые подогреватели дутья, что допустило применение для газификации по способу Монда топлив с высоким содержанием влаги — бурых углей и торфа с влажностью до 60%. Подогрев дутья доводится до 350° [1].

9. ОЧИСТКА ГАЗА ОТ СЕРОВОДОРОДА

Содержание сернистых соединений в газе

Сернистые соединения содержатся в газе преимущественно в виде сероводорода, в силу чего в дальнейшем рассматривается очистка газа именно от сероводорода.

Несмотря на горючесть сероводорода (5995 *кал*/*м*³ по высшему пределу), эта составная часть и продукты ее сгорания являются вредными вследствие влияния на здоровье людей и растительность, перехода в металлы, взаимодействия с расплавленной стекломассой, а также разъедания металлов сернистым ангидридом, образующимся в результате сгорания H_2S, наблюдающегося при температурах ниже точки росы.

Сероводород, получающийся в газе при газификации топлива, своим происхождением обязан сере угля.

В топливе сера находится частью связанной в органических соединениях, частью в виде колчедана и частью в виде сульфатов. При нагревании топлива и его сухой перегонке часть серы (подробнее см. в главе V) переходит в сероводород.

Табл. 3 характеризует содержание сероводорода в генераторном газе и газе сухой перегонки из некоторых русских топлив, подвергающихся газификации.

Способы очистки газа от сероводорода

Различают два способа очистки газа: сухой и мокрый.

При сухом способе очистки газ пропускают через твердую массу, в значительной мере состоящую из вещества, поглощающего сероводород.

[1] Данные о работе установок Монда см. в 1-м издании.

36* 212/1

Сухие способы очистки в высокой степени отвечают своему назначению и сильно распространены, но они имеют и отрицательные стороны, заставившие издавна разрабатывать способы мокрой очистки. Недостатками их являются обширность потребных помещений, громоздкость оборудования, большое количество потребной очистной массы, большая затрата рабочей силы при разрядках и зарядках ящиков и при регенерации массы, вредность работы для здоровья рабочих, затруднения в использовании отработанной очистной массы. В последнее время способ сухой очистки газа в значительной мере совершенствуется.

При применении мокрого способа газ очищается не порошком, а водными растворами или суспензиями веществ, поглощающих из газа сероводород. Этот способ очистки также получил большое распространение. Он более компактен, дешев, гигиеничен, проводится непрерывно, требует меньшей затраты рабочей силы и дает возможность получать некоторые побочные продукты.

Экономические преимущества очистки газа мокрыми способами видны из следующего [201]. Капитальные затраты на 1000 $м^3$ газа при содержании в нем H_2S около 7 $г/м^3$ составляют в год при сухом ящичном способе 6—7 руб., при сухом башенном способе — до 9 руб., при мокрых способах (Феррокс и Тайлокс) — около 3 руб.

Экономически наиболее выгоден мышьяковый способ газоочистки. Соотношение стоимости очистки 1000 $м^3$ газа по способу Феррокс и Тайлокс с учетом доходов от реализации серы равно 0,20 : 0,69.

Возможно также комбинирование мокрой очистки с сухой, так как мокрая очистка не вполне очищает газ. При этом с помощью сухой очистки удаляют из газа небольшие остатки непоглощенного сероводорода.

Возможно связывание сероводорода в самом генераторе. Известно, что в генераторах с жидким шлакоудалением при добавлении извести и окислов железа в качестве флюса выход сероводорода уменьшается. Ввиду простоты метода предлагается вводить в газогенераторы вещества для связывания серы. Видимым препятствием для этого метода является понижение плавкости золы.

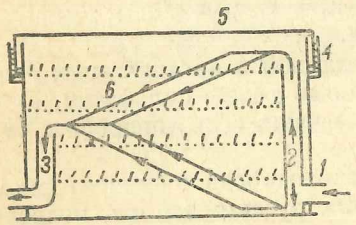


Рис. 209. Ящик для очистки газа от сероводорода

Сухая очистка газа

1. Очистка в ящиках. При сухой очистке очистная масса образует с некоторыми составными частями газа соединения, обволакивающие частицы очистной массы и препятствующие ее дальнейшему использованию. Поэтому реагирующее вещество должно быть возможно мельче. Очистная масса помещается в ящиках (рис. 209), представляющих собой большие прямоугольные коробки, закрываемые железными крышками *5* при помощи гидравлических затворов *4* или резиновых прокладок. Внутри ящика находится несколько расположенных друг над другом деревянных решеток *6*, перекрытых полотном, на которых насыпана очистная масса. Газ входит в отверстие *1*, распределяется по трубе *2* вверх и вниз, проходит очистной слой и выходит на уровне средней высоты ящика через трубу *3*. Деление газового потока на две части уменьшает его скорость, и она составляет 5—10 *мм/сек*, считая на полное сечение ящика. Существуют и иные способы расположения решеток и подвода и отвода газов. Примерная емкость ящика — 100 *т*. На 1000 $м^3$ газа в сутки требуется при четырех ящиках до 4 $м^3$ руды.

Скорость газа, считая на полное сечение, принимается равной 5—8 *мм/сек*.

Масса при проходе через нее газа поглощает из него сероводород, постепенно насыщаясь им, после чего поглощение сероводорода прекращается. Массу в этом случае нужно заменить свежей — перезарядить ящик. Для возможности непрерывной работы ставят несколько ящиков. При насыщении массы ящик выключают, открывают, удаляют массу, наполняют свежей или регенерированной воздухом, закрывают ящик и вновь включают его.

На больших заводах работает обычно последовательно не менее четырех ящиков, так как в одном или двух ящиках газ не успевает очиститься. Ящики соединяют таким образом, чтобы любой из них можно было переключить и выключить. Последний ящик ряда почти не воспринимает сероводорода и служит для надежности очистки на случай неудовлетворительной работы одного из предыдущих ящиков.

Ящики имеют обычно большие размеры, и каждый из них вмещает по несколько десятков тонн очистной массы. Они требуют сооружения больших построек для очистительных отделений и обходятся дорого. В мягком климате ящики можно устанавливать на открытом воздухе и делать их железобетонными. Крышки ящиков с сухим затвором обходятся дешевле, нежели с гидравлическим.

Первоначально газ пропускали через ящики с гашеной известью.

Гашеная известь поглощает CO_2 и H_2S, образуя $CaCO_3$ и CaS; CaS поглощает сероуглерод CS_2, образуя $CaCS_3$. Этот способ очистки газа может быть применен лишь в очень малых установках, в которых очистная масса не регенерируется, и при желании удалить CS_2. Известковая масса приготавливается путем смешения гашеной извести с влажными древесными опилками и помещается слоем в 150 — 200 *мм* на решетчатых полках, располагаемых в закрытых ящиках.

Скорость газа в известковом очистителе — до 7 *мм/сек*. Время пребывания газа — 10—15 мин.

2. Очистная масса. В настоящее время в качестве очистной массы применяется гидрат окиси железа, обычно—болотная железная руда, размолотая в грубый порошок. Она пориста, легко пропускает сквозь себя ток сырого газа, и ее в случае надобности можно разрыхлить древесными опилками или торфяной мелочью.

Если газ очищается предварительно от аммиака, к очистной массе прибавляют небольшое количество гашеной извести для сообщения массе щелочной реакции, при которой поглощение сероводорода идет лучше.

Поглощение сероводорода может быть представлено следующими реакциями.

Частично:

$$2Fe(OH)_3 + 3H_2S = Fe_2S_3 + 6H_2O, \quad (1)$$

частично, в присутствии аммиака:

$$2Fe(OH)_3 + 3H_2S = 2FeS + S + 6H_2O. \quad (2)$$

Имеют место и следующие реакции:

$$2Fe(OH)_3 + H_2S = 2Fe(OH)_2 + S + 2H_2O. \quad (3)$$

$$2Fe(OH)_2 + 2H_2S = 2FeS + 4H_2O. \quad (4)$$

$$2Fe(OH)_3 + FeS = 3Fe(OH)_2 + S. \quad (5)$$

Очистная масса соответственно увеличению содержания сернистого железа из бурой становится черной. В массе также накапливается сера, обволакивающая крупинки болотной руды.

Присутствие сероводорода в газе определяется с помощью бумажки, смоченной раствором уксуснокислого свинца. Смотря по окраске бумажки газом из данного ящика, самый ящик называется белым, кремовым, бурым и черным.

В ящиках всегда имеется достаточное количество закиси железа, так как идущее непрерывно поглощение сероводорода из газа сопровождается восстановлением окиси железа в закись.

Отработанная масса регенерируется окислением кислородом воздуха. Она рассыпается слоем в 100—200 *мм*, смачивается водой и перелопачивается 1—2 раза в сутки в течение нескольких дней. При регенерации протекают следующие реакции:

$$Fe_2S_3 + 1{,}5O_2(+5{,}65N_2) + 3H_2O = 2Fe(OH)_3 + 3S(+5{,}65N_2)$$

$$\begin{cases} 2FeS + S + O_2(+3{,}76N_2) + 2H_2O = 2Fe(OH)_2 + 3S(+3{,}76N_2) \\ 2Fe(OH)_2 + 0{,}5O_2(+1{,}88N_2) + H_2O = 2Fe(OH)_3 + 3S(+1{,}88N_2) \end{cases}$$

$$2FeS + S + 1{,}5O_2(+5{,}65N_2) + 3H_2O = 2Fe(OH)_3 + 3S(+5{,}65N_2)$$

Масса работает и регенерируется до тех пор, пока в ней не накопится столько серы (примерно 50%), что она обволакивает крупинки болотной руды и делает дальнейшее пользование массой невыгодным. Такая масса часто выбрасывается в отвал, хотя и возможно ее использование (см. ниже). Как при очистке газа, так и при регенерировании массы в ящиках выделяется тепло.

Вместо болотной руды может применяться бокситовый отвал (отброс производства гидрата окиси алюминия), названный по имени изобретателя люкс-массой. Он состоит из гидрата окиси железа, в котором содержится небольшое количество остатков соды, сообщающей ему слабощелочную реакцию, что одновременно со значительной раздробленностью гидрата окиси железа содействует очень быстрому поглощению сероводорода. Регенерация этой массы протекает весьма интенсивно.

Непригодная для дальнейшего поглощения сероводорода масса иногда используется. Сера может быть извлечена соответствующими

растворителями — сероуглеродом, бензолом и др.; возможно выплавление ее горячей водой под давлением. Подобной утилизации серы препятствует загрязнение массы примесями. Экономически это осуществимо лишь в крупных установках. Чаще сера отработанной массы перерабатывается на серную кислоту.

3. Добавление к газу воздуха. При прибавлении перед очисткой к газу воздуха одновременно с очисткой газа происходит регенерация массы. Реакции, происходящие при этом, можно выразить уравнением:

$$H_2S + \underbrace{0{,}5O_2(+1{,}88N_2)}_{\text{воздух}} = H_2O + S(+1{,}88N_2).$$

При этом в ящиках выделяется много тепла, и нужно наблюдать, чтобы ящики слишком не перегревались.

Прибавка воздуха к сырому газу для регенерации очистной массы в ящиках удлиняет период работы последних в 3—4 раза.

Теоретически потребное количество воздуха составляет примерно 2,5 $м^3$ на 1 $м^3$ H_2S. Так как регенерация массы происходит медленнее, чем поглощение сероводорода, то теоретического количества воздуха недостаточно. Поэтому масса постепенно теряет активность и должна подвергаться регенерации.

4. Башенные конструкции. Так как горизонтально расположенные очистители занимают много места, были предложены башенные конструкции [202] (рис. 210).

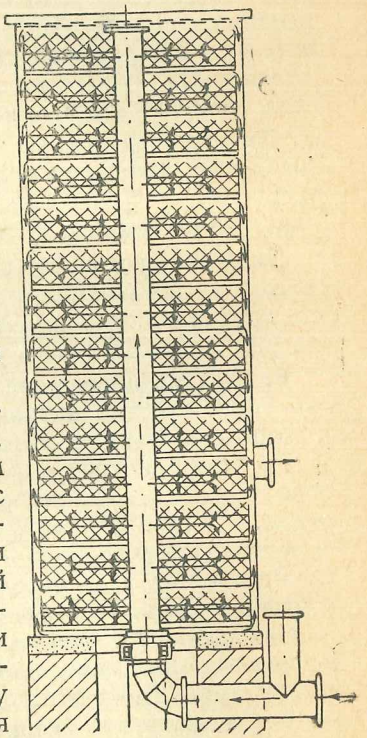


Рис. 210. Газоочистительная башня

Подобный очиститель представляет собой башню, в которую газ входит снизу. В башне располагается друг над другом большое количество железных коробок с очистной массой. Коробки снабжены втулками с отверстиями для входа газа и образуют центральную трубу, по которой проходит газ, распределяясь по отдельным коробкам. Газ, прошедший коробки двумя параллельными потоками, собирается в кольцевом пространстве между коробками и кожухом башни и отводится боковым штуцером. Зарядка башни производится с помощью крана.

Большой интерес представляет осуществленный в Германии способ очистки в башенных установках, при котором вместо мелкораздробленной массы применяются небольшие шарики диаметром в 15—20 *мм*, изготовленные из гидрата окиси железа. Шарики равномерно распределяются сами и равномерно распределяют газ по сечению аппарата, оказывают малое сопротивление проходу газа, обладают вы-

сокой пористостью, достигающей 60% объема, и нечувствительны к физическим и химическим воздействиям, которым они подвергаются при извлечении из них серы. В силу большой равномерности распределения газа скорость течения его может быть доведена до 100 *мм/сек* и более.

Уменьшение требуемого объема подобных очистительных установок сравнительно с обычными вызывается также тем, что 1 $м^3$ башни, наполненной шариками из гидрата окиси железа, содержит примерно 700 *кг* действующей окиси железа, тогда как в обыкновенных ящиках 1 $м^3$ содержит только 330 *кг*.

Опыты показали, что даже при содержании в газе сероводорода от 30 до 50 $г/м^3$ при указанной выше скорости газа очистка осуществляется полностью.

Количество серы, улавливаемой нижними рядами шариков в башнях, достигает 45% от их веса. Насыщенная масса отбирается внизу и направляется в специальную установку для выщелачивания растворителями с последующим выпариванием. Шарообразная форма массы чрезвычайно облегчает получение серы. Шарики поглощают серу всем своим объемом, а не только поверхностью.

Для очистки от серы газа в количестве 100 000 $м^3/сутки$ требуются две башни диаметром в 3850 *мм*, при высоте в 6 *м* каждая, так что установка требует только 25 $м^2$ площади против 200 $м^2$ для установки ящичной системы на ту же производительность.

Башенная установка с применением шариков может быть использована в комбинации с обыкновенными ящиками таким образом, что грубая очистка газа происходит в башнях при больших скоростях, а следы серы могут быть уловлены в ящиках.

6. Очистка активированным углем. К числу сухих способов очистки относится очистка активированным углем. Этот способ использован в производственном масштабе фирмой «I. G. Farbenindustrie».

По этому способу сырой газ смешивают с воздухом и пропускают через ряд цилиндрических котлов, наполненных активированным углем. Газ выходит чистым. На внешней поверхности угля происходит окисление сероводорода в серу, которая задерживается в порах угля. По насыщении угля серой его обрабатывают сернистым аммонием и извлекают серу. Регенерированный уголь вновь идет в работу.

Очищаемый газ предварительно полностью освобождается от смолы. Количество примешиваемого воздуха составляет 3—4% от количества газа. Смесь подогревают до 35—40° и добавляют от 0,3 до 0,5 *г* NH_3 на 1 $м^3$ газа, что благоприятствует процессу. Количество поглощаемой углем серы составляет от 40 до 150% от веса угля.

Выход серы по этому способу составляет около 95% от общего содержания ее в газе. Расход пара составляет 5—6 *кг* на 1 *кг* получаемой серы. Скорость прохождения газа через угольные фильтры — 80 *мм/сек*. Нормальная потеря давления — 50—60 *мм* вод. ст.

В случае наличия в газе смолистых веществ они поглощаются углем, подвергаются полимеризации и окислению и быстро приводят уголь в негодность. Недостаточная очистка газа от смолы препятствует также получению свободной серы в виде продукта

99%-ной чистоты. Недостатками способа являются дороговизна угля, громоздкость и необходимость в большой площади [203].

Мокрая очистка газа

Способы мокрой очистки генераторного газа можно разделить на две группы: очистку с улавливанием серы и очистку без улавливания серы.

К числу способов, предусматривающих улавливание серы, относятся: железо-содовый, аммиачно-железный, мышьяковый и ряд других; к числу способов без регенерации серы — способ Сиборда.

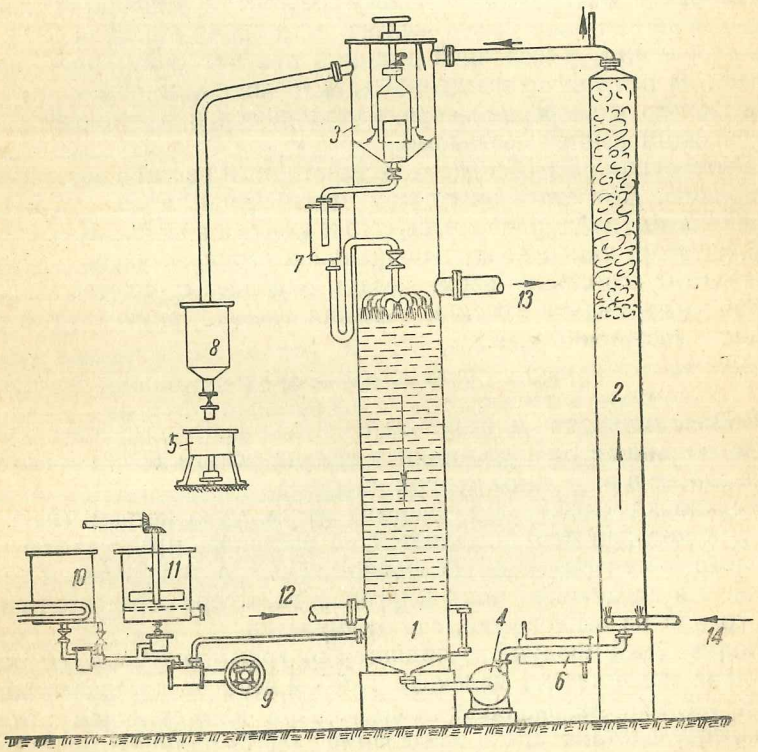


Рис. 211. Схема сероочистной установки по способу «Феррокс»:
1 — абсорбер, *2* — регенератор, *3* флотационное устройство, *4* — насос для отработанного раствора, *5* — центрифуга, *6* — подогреватель, *7* — переливной бачок, *8* сероотстойник *9* — насос для свежего раствора, *10* — бак для Na_2CO_3, *11* — бак для Fe $(OH)_3$, *12* — подвод газа, *13* — отвод газа, *14* — подвод воздуха от компрессора

1. Способ «Феррокс». Железо-содовый способ «Феррокс» заключается (рис. 211) в промывке газа в высоких башнях—абсорберах слабым содовым раствором (1—3%), содержащим от 1 до 2 *г/л* гидрата окиси железа. Промывка идет в противотоке (газ снизу, раствор сверху).

Реакции, протекающие в абсорберах при промывке газа поглотительным раствором, выражаются следующими уравнениями:

$$Na_2CO_3 + H_2S = NaHS + NaHCO_3. \quad (1)$$

$$3NaHS + 2Fe(OH)_3 = 2FeS + S + 3NaOH + 3H_2O. \quad (2)$$

$$NaOH + NaHCO_3 = Na_2CO_3 + H_2O. \quad (3)$$

Таким образом вначале идет поглощение сероводорода с образованием сульфгидрата и бикарбоната натрия; затем сульфгидрат реагирует с гидроокисью железа, образуя сернистое железо и едкий натр, разлагающий бикарбонат с обратным восстановлением соды.

Суммируя приведенные три уравнения, получаем четвертое:

$$2Fe(OH)_3 + 3H_2S = 2FeS + S + 6H_2O, \quad (4)$$

из которого видно, что основным реагентом в поглотительной жидкости является гидроокись железа, в то время как сода служит лишь для сообщения ей щелочной реакции, при которой процесс протекает лучше. В результате промывки газа в жидкости образуются сернистое железо и свободная сера, находящиеся в вытекающем растворе в суспендированном состоянии.

Вытекающий из абсорбера отработанный раствор поступает на регенерацию. Для этого он гонится центробежным насосом в башню — регенератор, куда подводится также сжатый воздух. Как отработанный раствор, так и воздух подаются в нижнюю часть регенератора и проходят его снизу вверх. Воздух окисляет сернистое железо, образуя вновь гидрат окиси и выделяя элементарную серу в коллоидальном состоянии, т. е.

$$4FeS + 6H_2O + 3O_2 = 4Fe(OH)_3 + 4S. \quad (5)$$

Образовавшаяся в результате окисляющего действия воздуха коллоидальная сера под влиянием механического действия его пенится и всплывает в виде пены поверх раствора.

Установка снабжается флотационным устройством (пеноотделитель), в котором сера отделяется от раствора, представляющего собой уже регенерированную поглотительную жидкость. Последняя вступает в следующий цикл круговорота, а сера передается в вакуум-фильтр или на центрифугу, где отжимается.

Полученный продукт не является совершенно чистым, так как серная пена механически увлекает с собой некоторое количество гидроокиси железа, загрязняющей серу. При внимательном отношении к процессу флотационного разделения удается получить продукт с содержанием серы около 80% в сухом веществе. Осажденная в процессе мокрой сероочистки сера замечательна тем, что находится в состоянии мельчайшего распыления: частицы ее имеют размер всего лишь 1—15 μ. Подобная дисперсность серы и способность легко прилипать к растительности делают ее исключительно ценным материалом для агрикультурных целей, в борьбе с вредителями сельского хозяйства.

Приведенные выше уравнения можно свести к следующему:

$$H_2S + O = H_2O + S.$$

Из этого уравнения видно, что в процессе теоретически не должно быть потерь соды и гидроокиси железа, и должна циркулировать постоянно одна и та же жидкость, периодически теряющая и восстанавливающая свои поглотительные свойства.

На практике побочные реакции, идущие главным образом в регенераторе, выводят из строя реагенты. Побочные реакции в регенераторе заключаются в окислении серы с последующим образованием тиосульфата натрия, что связывает некоторое количество соды и серы. Потеря гидроокиси железа связана с увлечением ее пеной.

Образование тиосульфата в количестве более 5% нежелательно также и потому, что ухудшает очистку газа и вызывает необходимость в смене раствора.

Увеличение щелочности раствора благоприятствует очистке газа, но усиливает развитие побочных реакций; поэтому не рекомендуется увеличивать щелочность раствора выше 2—3%. В результате образования роданистого натрия и гипосульфита можно выделить в свободном состоянии только 75% уловленной из газа серы.

В основном подобная установка (рис. 211) состоит из четырех частей: 1) поглотительной части (скруббера-абсорбера), 2) части для восстановления (регенератора), 3) отделения для обработки серной пены и 4) вспомогательных устройств для приготовления свежего раствора и переработки отработанного.

Для лучшего перемешивания газа и раствора абсорберы снабжаются насадкой. Интенсивное смешение воздуха и раствора достигается тем, что воздух подается в нижнюю часть регенератора соплами и проходит в смеси с жидкостью ряд сит, состоящих из железных мелких стружек, заключенных между железными штампованными сетками.

Наиболее благоприятной температурой для регенерации раствора является 40°, до этой температуры и подогревается раствор.

Степень очистки газа достигается по этому способу в 80—90% и больше. Для увеличения степени очистки соединяют последовательно по несколько абсорберов.

Оптимальное содержание $Fe(OH)_3$ [204] в поглотительном растворе составляет 0,5% (4—4,5 *г/л*) и Na_2CO_3 — 3% (6 *г/л*); оптимальная интенсивность орошения — 5 *л* раствора на 1 *м*³ газа. Коэфициент абсорбции составляет 3 *г* S на 1 *м*² насадки в час при разнице концентрации серы в исходном и очищенном газах в 1 *г/м*³. Оптимальные условия процесса регенерации: температура регенерации раствора 35—40° С; интенсивность аэрации 6—7 *м*³ воздуха на 1 *кг* поглощенной S; продолжительность соприкосновения жидкости и воздуха 25—40 мин.

Выход S примерно 85% от поглощенной из газа; влажность — 50%; зольность — 20—25%; консистенция пастообразная.

На 1 *кг* уловленной S расходуется 0,7 *кг* Na_2CO_3, если исходить из железного купороса, и 0,4 *кг* — при применении естественных гидратных руд. Расход $Fe(OH)_3$ составляет 0,3 *кг* на 1 *кг* S.

Согласно исследованиям, произведенным Нусиновым, железосодовый способ пригоден и для малосернистого газа, содержащего первоначально около 2 *г* H_2S в 1 *м*³. Оптимальной является 95%-ная очистка, что при малосернистом газе отвечает содержанию H_2S в очищенном газе в 0,1 *г/м*³. Возможна очистка до «следов» H_2S.

Ввиду большой высоты регенераторов (30—40 *м*) давление подаваемого в них воздуха должно быть большим, что связано с большим расходом электроэнергии на компрессию воздуха.

Фирма «Копперс» по этой причине заменяет регенератор аппаратом горизонтального типа, так называемым тионайзером. Он представляет собой камеру с перегородками, в которой регенерируемая жидкость протекает по длинному зигзагообразному пути. Воздух подается со дна камеры перфорированными трубами и отдельными струйками поднимается кверху. Образующаяся пена отводится в пеносборник. В этом аппарате расход воздуха на 30% больше, чем в башнях, но нет нужды в сильном сжатии воздуха.

Способ «Феррокс» надежен и прост. Недостатками его являются: большой расход пара и энергии, большие потери основных реагентов вследствие побочных реакций, загрязнение конечного продукта и содержание в нем не больше 70—80% серы, недостаточно полная очистка газа.

Получаемая по железо-содовому способу сера является очень зольной. Она может быть подвергнута очистке путем нагрева для удаления летучих органических веществ и перегонки, а также экстрагированием. Смолистые вещества, загрязняющие серу, сильно затрудняют ее очистку. Возможна очистка серы путем обработки ее серной кислотой, растворяющей золу серы.

2. Аммиачно-содовый способ. Аналогичен по схеме процесс очистки газа от сероводорода по Глууду и Шенфельдеру, в котором вместо соды, служащей для создания щелочной среды, применяется аммиак, содержащийся в газе.

При поглощении сероводорода протекают следующие реакции:

$$2NH_3 + H_2S = (NH_4)_2S.$$
$$3(NH_4)_2S + 2Fe(OH)_3 = 2FeS + S + 6NH_4OH.$$
$$3H_2S + 2Fe(OH)_3 = 2FeS + S + 6H_2O.$$

Дополнительно к оборудованию, устанавливаемому по предыдущим способам, устанавливается кислотный промыватель, в котором удерживается аммиак, увлеченный воздухом. В циркулирующей жидкости накапливаются в результате побочных реакций нерегенерируемые аммонийные соединения.

При испытании этого способа очистки газа степень очистки была очень высока — больше 99%. В виде сырой серы получалось 85% от количества поглощенной серы, 15% окислялось до тиосульфата аммония по реакциям:

$$2NH_4OH + S + O_2 = (NH_4)_2SO_3 + H_2O.$$
$$(NH_4)_2SO_3 + S = (NH_4)_2S_2O_3.$$

Полученная по аммиачно-железному способу сера, как и получаемая по железо-содовому, применяется в областях, где не имеет значения ее засоренность или же она должна быть подвергнута очистке.

3. Способ «Тайлокс». В способе «Тайлокс» для поглощения сероводорода служит раствор тиоарсената натрия или аммиака [205].

При воздействии на эти тиоарсенаты воздуха они абсорбируют из него кислород, замещающий в молекуле тиоарсената часть серы, осаждающейся в чистом виде, чем и пользуются для регенерации раствора.

Реакции поглощения сероводорода из газа могут быть представлены следующим образом:

$$Na_4As_2S_5O_2 + H_2S = Na_4As_2S_6O + H_2O, \quad (1)$$
$$Na_4As_2S_6O + H_2S = Na_4As_2S_7 + H_2O, \quad (2)$$

и реакции регенерации — следующим образом:

$$Na_4As_2S_7 + \frac{1}{2}O_2 = Na_4As_2S_6O + S, \quad (3)$$

$$Na_4As_2S_6O + \frac{1}{2}O_2 = Na_4As_2S_5O_2 + S. \quad (4)$$

Практически повидимому решающее значение имеют реакции (1) и (4), так как реакция (2) протекает медленно.

Приготовление раствора тиоарсената заключается в прибавлении к содовому раствору мышьяковистого ангидрида. Первоначальный раствор представляет собой сложную смесь, содержащую некоторое количество мышьяковистого натрия, быстро поглощающего сероводород и образующего тиоарсенаты. Для поглощения последними кислорода из воздуха раствор должен поддерживаться достаточно щелочным, и число атомов натрия и мышьяка должно соответствовать по крайней мере отношению 2 : 1.

При окислении мышьяка углекислота постепенно удаляется, и раствор оказывается практически свободным от карбонатов. Вообще углекислота и карбонаты не оказывают существенного влияния на процесс.

В отсутствии карбонатов процесс идет следующим образом:

$$2Na_2HAsO_3 + 5H_2S = Na_4As_2S_5 + 6H_2O \quad (5)$$

или

$$2NaOH + 2NaAsO_2 + 5H_2S = Na_4As_2S_5 + 6H_2O$$

и

$$Na_4As_2S_5 + O_2 = Na_4As_2S_5O_2. \quad (6)$$

Тиоарсенат, полученный по уравнению (6), и представляет собой главное действующее вещество в способе «Тайлокс».

Повышенное содержание Na_2CO_3 влечет за собой развитие побочных реакций, связанных с потерей серы и соды за счет образования сульфгидрата NaHS с последующим окислением до $Na_2S_2O_3$ при регенерации раствора. Образование гипосульфита заставляет выводить из цикла часть раствора. Выводимый раствор обрабатывается серной кислотой для выделения сернистого мышьяка, возвращаемого в раствор. Увеличение концентрации раствора позволяет уменьшить количество циркулирующей жидкости и сделать установку более компактной за счет увеличения скорости поглощения сероводорода. Однако при этом увеличивается и потеря соды. Содержание мышьяковистого ангидрида в растворе составляет 5—10 *г/л*, соды — 6—13 *г/л*.

Тиоарсенаты аммония ведут себя так же, как и соли натрия. Поэтому можно заменить соду аммиаком, особенно в тех случаях, когда аммиак содержится в газе.

Схема процесса очистки газа по способу «Тайлокс» сходна со схемой способа «Феррокс» и заключается в следующем.

Подвергающийся очистке газ промывается в скруббере-абсорбере слабым раствором реагента, вступающего в реакцию с сероводородом. Отработанная жидкость, содержащая серу в соединении с реагентом, поступает в регенераторы, обычно башенного типа, в которых через жидкость поступает воздух. При этом реагент соединяется с кислородом воздуха, выделяя серу.

Сера вместе с пузырьками воздуха образует пену, отделяемую от раствора, вновь поступающего в абсорбер. Пена поступает в пеносборник. Для поддержания серной суспензии в пеносборнике во взвешенном состоянии она периодически перемешивается (например сжатым воздухом). Обезвоживание пены производится вакуум-фильтром или фильтрпрессом. Получаемая серная масса может быть использована в виде пасты или переплавлена в кусковую серу.

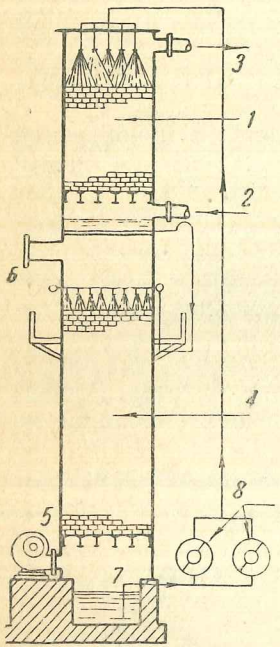


Рис. 212. Схема мокрой очистки по способу Сиборда:
1 — скруббер-промыватель, *2*—вход сырого газа, *3*—выход очищенного газа, *4*— регенератор, *5* — воздушный вентилятор, *6* — отвод отработанного воздуха, *7* — резервуар для раствора, *8*— центробежные насосы

Раствор, поступающий на регенерацию, подогревается до 40° — оптимальной температуры для регенерации.

Для нейтрализации отводимого раствора предусматривается установка нейтрализатора, размеры которого определяются максимально допустимой концентрацией $Na_2S_2O_3$ в растворе (50—70 *г/л*).

Для предупреждения попадания в сточные воды мышьяка устанавливается контрольный фильтр, задерживающий остатки мышьяка, вообще говоря, выпадающего на 100% в нейтрализаторе.

Сходство аппаратуры при железо-содовом и мышьяково-содовом способах дает возможность использовать одну и ту же установку для работы на любом растворе. Расход соды невелик: 0,15—0,25 *кг* на 1 *кг* серы и мышьяка — 5—6 *кг* на 1 *т* серы. Выход серы очень высок — 97—99,9%. Получаемая сера чиста (97—99%), что также является большим преимуществом этого способа. Стоимость очистки невелика (см. выше). (Дополнительные показатели — см. в табл. 91).

4. Способ Сиборда. В Америке практикуется очистка больших количеств газа раствором соды, протекающая по следующим реакциям:

$$H_2S + Na_2CO_3 = NaHS + NaHCO_3.$$

$$CO_2 + H_2O + Na_2CO_3 = 2NaHCO_3.$$

$$HCN + Na_2CO_3 = NaCN + NaHCO_3.$$

Таблица 91

Расходные коэфициенты и оптимальные условия работы, полученные на полузаводской установке при переработке 1000 *м*³ коксового газа в час

№ п. п.	Статьи	Способы очистки: железо-аммиачный	Способы очистки: мышьяковый
1	Концентрация в растворе Na_2CO_3	—	12 *г/л*
2	» » » $Fe(OH_3)$	2,5—3 *г/л*	—
3	» » » NH_3	6—7 »	—
4	» » » As_2O_3	—	5—7 *г/л*
5	Количество жидкости, подаваемой на 1 *м*³ газа	10—12 *л*	10—12 *л*
6	Температура поглотительной жидкости	40°	40—50°
7	Удельный вес раствора	1,05	—
8	Расход воздуха на 1 *кг* поглощенной из газа серы	5—5,5 *м*³	7 *м*³
9	Расход соды на 1 *кг* поглощенной серы	—	0,08—0,1 *кг*
10	Расход Fe_2O_3	0,14	—
11	» NH_3	30—40% (от поглощаемой)	—
12	» As_2O_3	—	0,005 *кг*
	Состав влажной пасты		
13	Серы	—	57,5—55%
14	As_2O_3	—	0,31—0,34%
15	Влаги	—	40—42%
16	Примесей	—	2,2—2,5%
17	Коэфициент улавливания H_2S из газа	98—99%	96—97%
18	Выход элементарной серы при регенерации в % от поглощенной из газа	75—80%	98—100%

Через использованную жидкость продувается воздух, и реакция протекает в обратном направлении. Сода образуется вновь и вновь может быть использована. Вдувание воздуха имеет целью изменить условия равновесия в жидкой фазе.

Подобная установка Сиборда состоит из четырех частей (рис. 212): 1) промывной башни — абсорбера; 2) регенеративной башни — активатора, 3) насоса для циркулирующего промывного раствора и 4) вентилятора для регенерирующего воздуха.

Промывная и регенеративная башни расположены одна над другой, однако вполне применимы и другие конструкции и расположения. Неочищенный газ входит в абсорбер, орошается раствором и выходит грубо очищенным (очистка — 90%). Отработанный раствор протекает регенеративную башню, где навстречу ему поступает оживляющий его воздух.

Теоретически содовый раствор может работать бесконечно, практически же понемногу приводится в негодность побочными реакциями образования тиосульфата и роданида:

$$2NaHS + 2O_2 = Na_2S_2O_3 + H_2O$$

и

$$HCN + NaHS + O = NaCNS + H_2O.$$

На 1 *кг* сероводорода затрачивается 0,1—0,2 *кг* соды. Раствор содержит 1—3% соды. Интенсивность орошения — 6—8 *л* на 1 $м^3$ газа. Расход электроэнергии на насосы и вентилятор — 2—3 *квт-ч* на 1000 $м^3$ газа.

Чем выше крепость раствора, тем труднее его регенерировать и тем больше потери вследствие побочных реакций. Применение растворов, содержащих больше 5% соды, нежелательно.

Обслуживание установки обычно не требует специального лица и заключается в обслуживании насосов, вентиляторов, анализа газа до и после аппарата, определении щелочности раствора и добавлении соды. Периодически требуется определение содержания сероводорода в жидкости, выходящей из активатора. Заметной коррозии в аппарате не происходит. В случае возможных отложений смол следует предусматривать запасной активатор.

Мокрая сероочистка является сильным охладителем газа. Опыты, произведенные в аппарате Сиборда, показали, что газ не должен охлаждаться ниже 7°. Подогревание раствора возможно паром.

Производительность подобных американских установок колеблется в пределах 60 000—850 000 $м^3$/*сутки*. Из газа удаляются при промывке 90% сероводорода и почти вся синильная кислота. Остатки сероводорода могут быть удалены сухой очисткой в очистных ящиках гидратом окиси железа. Загрязненный воздух либо отводится в атмосферу, либо применяется как воздух, необходимый для горения. В обоих случаях в атмосферу попадают вредные сернистые соединения (H_2S, SO_2), так что способ в такой форме выполним только в малонаселенных местностях.

Способ очень прост, требует малых затрат и площадей, дешев и в случае необходимости очистки небольших количеств газа дает наилучшее решение вопроса очистки газа от сероводорода (в комбинации с сухой очисткой или без таковой в зависимости от необходимой степени очистки).

В СССР к типу установок с мокрой очисткой газа без сероулавливания относится установка с промывкой содовым раствором на Семилукском шамотном заводе, оборудованном антрацитовыми газогенераторами.

Производительность башни — 3000 $м^3$ газа в час при содержании 1% серы в антраците. Установка из одной башни обслуживает силовую станцию, состоящую из двух газовых машин по 425 *квт*.

Установка сероочистки имеет следующее вспомогательное оборудование: один вентилятор производительностью в 40 000 $м^3$ воздуха в час при давлении в 80 *мм* и 580 оборотах (требуемая мощность — 19 *квт*, установленная мощность мотора — 23,5 *квт*); два центробежных насоса для содового раствора (один резервный) производительностью в 80 $м^3$ раствора в час, высотой подъема 30 *м* и высотой всасывания в 4 *м* (число оборотов — 1430, требуемая мощность — 15,5 *квт*, установленная мощность моторов — 14,7 *квт*). Вентилятор и насосы предназначались для обслуживания трех башен.

Башня имеет внутренний диаметр в 3,2 *м* и высоту около 23 *м* и состоит из двух отделений: верхнего — очистителя газа и нижнего — оживителя раствора. Оба отделения заполнены коксом. Газ подается газопроводом в нижнюю часть верхнего отделения, проходит через барботер и поднимается кверху, орошаясь содовым раствором. Очищенный газ выходит в верхнюю свободную часть отделения и опускается вниз отдельным газопроводом. Содовый раствор насосом подается наверх, распределяется дырчатым листом по сечению башни и течет вниз по коксовой насадке, орошая газ.

Отработанный содовый раствор через сифонную трубку перетекает из верхнего отделения в нижнее, распределяется по сечению и течет, омывая коксовую насадку и соприкасаясь с вдуваемым снизу воздухом. Содовый раствор собирается внизу в бетонном резервуаре и отсюда самотеком перетекает в яму насосов. Воздух подается в нижней части башни и направляется кверху, навстречу отработанному раствору, регенерируя его. Загрязненный выделенными из газа примесями воздух отводится специальной трубой, выведенной выше башни в атмосферу.

Установка [1] была выполнена в 1930 г., но не пускалась до середины 1931 г. ввиду многочисленных неплотностей, обнаруженных при испытании давлением. В середине 1931 г. она была уплотнена и пущена, причем обслуживала один двигатель. Башня работала 3 месяца. Производительность ее составляла—соответственно потреблению двигателем газа — 1000 $м^3$/*час*. Падение давления газа в башне составляло 25—45 *мм*. Вентилятор был нагружен примерно на $^1/_3$—$^1/_2$ (15 000—20 000 $м^3$/*час*). Количество раствора не замерялось, но было тем больше, чем меньше была концентрация соды, колебавшаяся в пределах 2,5—5%.

Соответственно небольшой производительности башни очистка была очень хорошая, и смоченная уксуснокислым свинцом бумажка не показывала окрашивания. Количественных определений содержания сероводорода специально не производилось; при испытании генератора содержание H_2S в сыром газе составило 0,14%.

Основными недочетами, препятствующими применению способа в населенных местах и в большом размере, являются отравление воздуха и потеря серы.

5. Опыты в СССР. Из числа описанных выше способов очистки газа и улавливания серы для газогенераторных установок в СССР помимо сухого способа очистки ящиками с болотной рудой применяют и проектируют способы «Феррокс», «Тайлокс» и Сиборда.

В табл. 91 приведены данные о расходных коэфициентах и оптимальных условиях работы, полученные на опытной полузаводской установке [206, 207] (см. также стр. 571 и 574).

Помимо описанных способов очистки газа от сероводорода известно и много других: с помощью органических оснований (удаляющих сероводород и углекислоту), солей меди, кальция и т. д.

---

1 Чертеж см. в 1-м издании, № 212.

10. УДАЛЕНИЕ ИЗ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА УГЛЕКИСЛОТЫ И ДРУГИХ ГАЗОВ

Для уменьшения удельного веса газа, увеличения его теплотворной способности или в силу технологических требований к газу как сырью является желательным освобождение газа от углекислоты.

Повышенное количество углекислоты содержит газ, получаемый из молодых топлив — дров и торфа. Много углекислоты содержит газ, получаемый при парокислородном дутье, и особенно газ, получаемый в генераторах, работающих под высоким давлением.

Углекислота, как и сероводород, обладает свойствами кислоты и способностью связываться с основаниями. Обычно под очисткой газа от углекислоты понимают не полное удаление ее из газа, а только уменьшение ее содержания.

Углекислота может быть выделена физическим или химическим путем. В первом случае газ подвергается сильному сжатию и одновременному охлаждению; при этом углекислота вымораживается или сжижается или же растворяется в промывной воде. Энергию сжатия газа и воды, а также углекислоту, выделяющуюся из воды, в дальнейшем можно использовать.

Если сжатия газа не требуется для целей дальнейшей обработки его или транспортирования на дальнее расстояние, то поглощение углекислоты из газа с помощью промывки водой под давлением является неэкономичным вследствие большой затраты энергии.

Поглощение углекислоты водой препятствует полному растворению сероводорода.

Удаление углекислоты из газа химическим способом обычно производится путем связывания ее щелочами.

На некоторых заводах в Англии сухие очистители загружаются порошкообразной, слегка увлажненной с помощью разбрызгивателей обожженной известью. При проходе газа через массу полностью выделяются сероводород и углекислота. Отработанная известь служит материалом для удобрения [208].

Способ промывки газа известковым молоком, образующим в соединении с сероводородом гипс, а с углекислотой — углекислый кальций, применяется сравнительно редко ввиду засорения системы получающимися продуктами и трудности очистки раствора.

Промывка газа в целях удаления CO_2 производится обычно раствором едкого натра. Связывание CO_2 идет по реакции:

$$2NaOH + CO_2 = Na_2CO_3 + H_2O.$$

В больших установках получаемый раствор регенерируется путем кипячения с гидратом окиси кальция:

$$Na_2CO_3 + Ca(OH)_2 = 2NaOH + CaCO_3.$$

Возможно связывание углекислоты растворами карбонатов. Углекислота освобождается путем нагревания раствора. Для создания благоприятных условий абсорбции при удалении углекислоты применяют сравнительно слабые растворы с содержанием углекислого натрия не более 8—10% или поташа 15—20%.

Для одновременного удаления сероводорода и углекислоты может быть применен способ очистки с помощью органических оснований (способ Гирдлера). По этому способу в результате связывания сероводорода и углекислоты образуются комплексные соединения типа:

$$2RNH_2 + H_2S = (RNH_2)_2H_2S.$$
$$2RNH_2 + CO_2 + H_2O = (RNH_2)_2H_2CO_3.$$

При слабом нагревании реакции протекают в обратном направлении, и поглощенные газы выделяются, восстанавливая реагент.

Пригодными для очистки газа основаниями являются ди- и триэтаноламины: $NH(CH_2CH_2OH)_2$ и $N(CH_2CH_2OH)_3$.

Эти соединения стойки и имеют высокую температуру кипения, что определяет малую их потерю. Они хорошо поглощают сероводород и углекислоту. Применяются они в виде 50%-ного раствора. Углекислота и сероводород могут быть уловлены.

Установка по описанному способу имеет малые размеры, расход реагентов невелик, расход пара для подогрева отработанного раствора мал, очистка газа хороша (по некоторым данным, в очищенном газе 0,11—0,046 *г/м*³ H_2S и 0,01% CO_2) [208].

Иногда после промывки газа водой под давлением его подвергают окончательной очистке с помощью едкого натра или жидкого аммиака для удаления углекислоты, сероводорода и других примесей.

Кислород для удаления связывают в воду, сжигая имеющийся в избытке водород на поверхности нагретой медной сетки или на тонко раздробленной медной или другой контактной массе.

В качестве одного из методов очистки газа для получения азотно-водородной смеси для целей синтеза аммиака применяется отмывание углекислоты водой под давлением и поглощение остатков (после конвертирования) окиси углерода растворами медных солей при избытке аммиака. Образовавшиеся комплексные соединения при повышении температуры распадаются с выделением окиси углерода.

Водород из газа наиболее просто может быть выделен путем конденсации сопровождающих его газов методом охлаждения газовой смеси до температуры жидкого воздуха. Главным преимуществом этого способа разделения газов является почти полное освобождение водорода путем промывки жидким азотом от окиси углерода и метана.

☆

УКАЗАТЕЛЬ ЛИТЕРАТУРЫ

☆

1. Robert A., Hedfeld, Wart, Surgent R., Труды II всемирной энергетической конференции, 1930.
2. Федоров И. А., Газовое отопление и стеклоплавильные печи, М. 1891.
3. Хаслам Р. Т. и Руссель Р. П. Топливо и его сжигание, перевод, ГГНИ, 1934.
4. Dolch P., Wassergas, Leipzig, 1936.
5. Berthelot Ch., «Genie Civil», № 5, v. 109, 1936.
6. Гаусбранд Е., Сушка воздухом и паром, перевод, ОНТИ, НКТП—ГНТИУ, 1934.
7. Шорин С. «Известия ВТИ», № 3, 1933.
8. Mayer M. u. Altmeyer V., «Journal für Gasbeleuchtung», 1909.
9. Шенк Г., Физико-химия металлургических процессов, ч. 1, перевод, ОНТИ, НКТП, ГНТУ, 1935.
10. Hawk, Golden, Strock a. Fieldner, «Industrial and Engineering Chemistry», № 1, 1932.
11. Osann, «Tonindustrie Zeitung», 1907.
12. Партингтон, Дж. Р. и Раковский А. В., Курс химической термодинамики, перевод, ХТИ, 1932.
13. Falcke, «Zeitschrift für Elektrochemie», № 1, 1927.
14. Jüptner H., Beiträge zur Theorie des Generator- und Wassergases, Stuttgart, 1904.
15. Franz Fischer, Helmut, Picheir u. Relf Pieder, «Brennstoffchemie», № 18, 1932.
16. Agde u. Lynke, Von den Kohlen und Mineralölen, 1928.
17. Dent F. I., Cobb I. W., «Journal of the Chemical Society», сентябрь 1929.
18. Langmuir I., «Journal of the American Chemical Society», 1915.
19. Mayers M., «Journal of the American Chemical Society», № 1, 1934.
20. Brewer R. E. a. Reyerson L. H., «Industrial and Engineering Chemistry», № 9, 1934.
21. Jones, King u. Sinnatt, Kohle, Koks, Teer, 12, 1927.
22. Martin H. u. Meyer L., «Zeitschrift für Elektrochemie», № 3, 1935.
23. Clement, Adams a. Haskins, U. S. A. Bureau of Mines Bulletin № 7, 1911.
24. Read. a. Wheeler, «Journal of the Chemical Society», 1910, 1911, 1912.
25. Солодовников, Г. А., Методы химической переработки низкосортных углей, ГНТИ, Л. 1931.
26. Гаврилов Н., Н. и Эдельштейн Н. Г., Труды Научно-исследовательского торфяного института, вып. 6, 1931.
27. Bunte K., «Zeitschrift für angewandte Chemie», 1926.
28. Keene W., Turner H. Scott G., «Transaction of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers», 1934, Coal Division.
29. Schench u. Zimmermann, «Berichte», № 1, 1903.
30. Cobb, I. W., Fuel, № 11, 1927.
31. Fox a. White, «Industrial and Engineering Chemistry», № 3, 1931.

32. Weiss C. B. a. White A. H. «Industrial and Engineering Chemistry», № 1, 1934.
33. Falk, «Journal of the Chemical Society», 1907.
34. Rideal, «Journal of the Chemical Society», 1919.
35. Kreisinger, Augustin and Ovitz, «U. S. A. Bureau of Mines, Bulletin , 1917.
36. Smit A., Proceedings of the Royal Society, 1863.
37. Bell L., The Chemical Phenomena of Iron Smelting, D. Van Nostrand Co, 1872.
38. Baker C. J., Journal of the Chemical Society», 1887.
39. Baker H. B., «Phil. Transaction», 1888.
40. Dixon, Cantor Lectures on «The Use of Coal Gas», 1884.
41. Smithels a. Ingle, «Journal of the Chemical Society», 1892.
42. Farup, «Zeitschrift für anorganische Chemie», 1906.
43. Ауфгейзер А., Топливо и его горение, перевод, Энергоиздат, 1933.
44. Read a. Wheleer, «Journal of the Chemical Society», 1913.
45. Энергетические ресурсы СССР, изд. АН, 1937.
46. Third World Power Conference, 1936, Section 1, Paper № 1.
47. Shah, «Journal of the Chemical Society», 26, 76, 1929.
48. Shivonen V., «Ann. Acad. Scient. Fenn.» (A), 33, Heft 6.
49. Meyer L. «Zeitschrift für physikalische Chemie», B. 17, 1932.
50. Neummann, von Ahlen, «Brennstoffchemie», № 4, 1934.
51. Nusselt, «V. D. I.», № 6, 1924.
52. Burcke u. Schumann, Труды международной конференции по битуминозным углям в Питтсбурге, 1931.
53. Tu, Davis a. Hottel, «Industrial and Engineering Chemistry», № 7, 1934.
54. Davis H. a. Hottel H. C., «Industrial and Engineering Chemistry», № 8, 1934.
55. Блинов В. И., «Известия ВТИ», № 7, 1934.
56. Блинов В. И. и Хайкина С. Э., «Известия ВТИ», № 6, 1935.
57. Parker a. Hottel, «Industrial and Engineering Chemistry« № 11, 1936.
58. Wendt, «Forschungsarbeiten», Heft 31, 1905.
59. Neumann K., «Forschungsarbeiten», Heft 140, 1914.
60. Гродзовский М. К. и Чуханов З. Ф., «Журнал прикладной химии», т. VII, вып. 8, 1934.
61. Гродзовский М К. и Чуханов З. Ф., Химия твердого топлива, т. VII, вып. 9—10.
62. Strache. «Handbuch der Gastechnik», v. IX, München u. Berlin, 1919.
63. Hahn O., «Zeitschrift für physikalische Chemie», 1903.
64. Бриан В., Вычисление равновесия водяного газа, перевод, журн. «Химстрой», № 2, 1932.
65. Naumann A. a. Pistor C., «Berichte», B. 18, 1885.
66. Smidt P. u. Gro E., «Braunkohlenarchiv», 44, 1936.
67. White U. Schulz, «Industrial and Engineering Chemistry», № 1, 1934.
68. Bone a. collaborators, «Journal of the Chemical Society», 192, 1906.
69. Bone a. Howard, «Proceedings of the Royal Society», 100 A, 1921.
70. Langlois, «Ann. Chim. Phys.», 3, Ser. 51, 1857.
71. Long I. H., «Liebigs. Ann», 191, 1878.
72. Ulich H., Schwarz C. u. Cruse K., «Archiv für das Eisenhüttenwesen», № 11, 1937.
73. Lang I., Zeitschrift für physikalische Chemie», 1888.
74. Harries, «Gas und Wasser Fach», 1894.
75. Haber u. Richardt, «Zeitschrift für Anorganische und allgemeine Chemie», 38, 5, 1904.
76. Clement a. Adams, «U. S. A. Bureau of Mines Technical Paper», Bulletin, № 7. 1911.
77. Gwosdz, «Angewandte Chemie», I, 1918.
78. Haslam, Hitchcock a. Rudow, «Industrial and Engineering Chemistry» № 15, 1923.
79. Pexton a. Cobb, «Gas World», 1923.

80. Brender G. A. à. Brandis, Le Nobel, «Het Gas», 1927.
81. Thiele, a. Haslam, «Industrial and Engineering Chemistry», 1927.
82. Bunte K. u. Giessen, «Gas und Wasser Fach», 1930.
83. Гаврилов Н. Н. и Богданов Н. Н., Основы термической переработки торфа, ГНТИ, 1932.
84. Dolch M., Dietzel u. Kollwitz, «Braunkohle», 1931, 1932.
85. Neumann B., Kröger u. Fingas, «Gas und Wasserfach», 1931.
86. Dolch P., «Zeitschrift für Elektrochemie», 1932.
87. Terres E., Patscheke G., Hofmann H., Kovacs St. u. Löhr O., «Gas und Wasserfach», № 35—40, 1934.
88. Brewer R. E. a. Reyrson L. H. «Industrial and Engineering Chemistry» № 7, 1934.
89. Taylor a. Neville, «Journal of the American Chemical Society», 1921.
90. Cobb a. collaborators, Inst. Gas. Eng., 1923—1927.
91. Report of the Institute of Gas Engineers, 1926.
92. Griffith R. H., Water Gas, London, 1934.
93. Neumann B., Kröger u. Fingas, «Zeitschrift für Anorganische und allgemeine Chemie», 1931.
94. Brewer R. E. a. Reyerson L. H., «Industrial and Engineerin Chemistry», № 9, 1935.
95. Strache u. Jahoda, «Gas und Wasser Fach», 1900.
96. Strache u. Jahoda, «Gas und Wasser Fach» 1903.
97. Fuel Researsh Board Technical Paper, 6, 1923.
98. 10th Report of the Research Sub-Committee of the Gas Investigation Committee of the Institute of Gas Engineers, «Gas Journal», 163, 1923.
99. Carbonisation Gommittee Report A. G. A., 1926.
100. Haslam, Ward a. Boyd, Carbonisation Committee, Americang Gas Assosiation, 1926.
101. Thau A., «Brennstoff und Wärmewirtschaft» 18, 1936.
102. Reinders, «Zeitschrift für physikalische Chemie», 130, 1927.
103. Bone a. Wheeler, «Engineer», 1907—1908.
104. Clement, «Journal of the Iron and Steel Institute». 1923.
105. Haslam, Entwistle a. Gladding, «Industrial and Engineering Chemistry», 1925.
106. Mackie a. Reed, «Mass. Inst. Techn. M. S. Thesis», 1925.
107. Haslam, Ward a. Mackie, «Industrial and Engineering Chemistry», 1927.
108. Fleer A. W. a. White A. H., «Industrial and Engineering Chemistry», № 11, 1936.
109. Windett V., Jearbook of the American Iron and Steel Institute, 1931.
110. Goff, I., «Indusrial and Engineering Chemistry, 1926.
111. Galozci, «Газификация с парокислородным дутьем». Труды II всемирной энергетической конференции, 1930.
112. Gubmann O., «Metallgesellschaft», № 8, 1933.
113. Дель, журн. «Вестник науки и техники», № 4, 1933.
114. Рябцев И. И., Журнал химической промышленности, № 4, 1935.
115. Фрост А. В., Термодинамика реакций углеводородов, журн. «Химия твердого топлива», вып. 2, 1933.
116. Ostwald W., Beitrage zur grafischen Feuerungstechnik, 1920.
117. Ostwald W., «Feuerungstechnik», 1933.
118. Faber, Braunkohlen—Generatorgas, Halle, 1928.
119. Hermanns H., Gaserzeuger und Gasfeuerungen, Berlin, 1923.
120. Rambush N., Modern Gas Producers, London, 1923.
121. Gwosdz I, «Die Wärme» № 47, 1936.
122. Кармазин В. И., журн. «Теория и практ. металлургии», № 12, 1936.
123. Möller R., «V. D. I.», № 40, 1937.
124. Rambush N., Труды II всемирной энергетической конференции, 1930.
125. Доброхотов Н. Н., Лебедев Н. И., Цветков А. М. и Родионов М. И., сборн. «Угли Западной Сибири в топках паровых котлов и газогенераторах» ГНТИ, 1933.

126. Грум-Гржимайло В. Е., Пламенные печи, изд. ВТИ, 1925.
127. Gwosdz I., «Brennstoffchemie», Heft 21, 1936.
128. Dent F., «Gas Journal», 1933.
129. Гвоздь И., Двойной водяной газ, перевод, ГНТИУ, 1934.
130. Gwosdz I., «Braunkohle», № 49 и 50, 1931.
131. Berthelot Ch., «Genie Civil», v. 106, 16 января 1937.
132. Stief, «Gas und Wasser Fach», № 29, 1932.
133. Gerdes, «Braunkohle», № 13 и 14, 1935.
134. Шак А., Теплопередача в промышленных установках, перевод, ОНТИ, Энергоиздат, 1933.
135. «Brennstoffchemie», № 6, 1933.
136. Schroth u. Conrad, «Gas und Wasser Fach», № 25, 1934.
137. Drawe, Gas und Wasser Fach», № 28, 1933.
138. Feild A. a. Rayster P., «Bureau of Mines U. S. A.», Technical Paper, № 189, 1918.
139. Mc. Caffery, Lorig, Goff и др. «Bureau of Mines U. S. A.» Technical Paper, № 383, 1931.
140. Rambush N. E. a. Rixon F. F., «Iron and Coal Trade Revue», vol. 123, 1931.
141. Servais, Вопросы металлургии, НТО ВСНХ, УССР, 1926.
142. Dessemond A., «Revue Universelle des Mines», 1922.
143. Fischer, Kraftgas, Leipzig, 1921.
144. «Доменная плавка на торфе». Материалы комиссии при президиуме Мособлисполкома по выплавке чугуна и торфа из руд и агломерата пиритных огарков, М. 1933.
145. «Доменная торфокислородная плавка». Материалы комиссии при президиуме Мособлисполкома по выплавке чугуна на торфе, М. 1933.
146. Тренклер, Газогенераторы, перевод под редакцией и с дополнениями Н. Н. Лазарева, ОНТИ, Энергоиздат, М. 1933.
147. Balley K., «Chemiker Zeitung», 1921.
148. Thau A., Труды международной конференции по битуминозным углям в Питтсбурге, 1931.
149. Grimm H. G., Труды международной конференции по битуминозным углям в Питтсбурге, 1931.
150. Bosch C., «Die Chemische Fabrik», № 4, 1934.
151. Gwosdz I., «Brennstoff und Wärmewirtschaft», 3, 45, 1936.
152. Starke, Gasfernversorgung, Leipzig, 1924.
153. Теплотехническое бюро в Дюссельдорфе, Нормы расхода энергии в черной металлургии, ОНТИ, 1934.
154. Маслов А. Г. и Мигулин Н. А., «Энергетика», № 3, 1930.
155. Power Gas Corporation, «Engineering», March, April 1929.
156. Lut F., «Stahl und Eisen», Heft 49, 1932.
157. Hecker E., Gas und Wasserfach», № 18, 1932.
158. Braunkohlen-Anhaltszahlen, Köln, 1928.
159. Fabian, «Zeitschrift für angewandte Chemie», № 28, 1925.
160. Стадников Г. Л., Химия угля, ГНТИ, М. 1932.
161. Карелин А. И. и Коллегаев А. В., Качественные характеристики топлив СССР, ГЭИ, 1932.
162. Сапожников Л. М. и Базилевич Л. П., журн. «Химия твердого топлива», т. III, 1932.
163. Brender á Brandis G. A., Le Nobel I. W., «Het Gas», № 2, 1927.
164. Марковский Л. Я., журн. «Химия твердого топлива», в. VI, 1936.
165. Фишер Р., Превращение углей в жидкое состояние, М. 1926.
166. Копытов В. Ф., журн. «Строительные материалы», № 10, 1932.
167. Шишаков Н. В., журн. «Известия ВТИ», № 2, 1932.
168. Шишаков Н. В., журн. «Известия ВТИ» № 3, 1932.
169. Гинзбург Д. Б. журн. «Керамика и стекло», № 6, 1930.
170. Шишаков Н. В. журн. «Известия ВТИ», № 4, 1932.
171. Шишаков Н. В., журн. «Известия ВТИ» № 12, 1932.
172. Доброхотов Н. Н., Глинков М. А. и Иванцов К. П., сборн. «Угли Западной Сибири в топках паровых котлов и газогенераторах», ГНТИ, 1933.

173. Berg, «Iernkontores Annallen», 1930.
174. Бациев М. А., журн. «Советское котлотурбостроение», № 2, 1936.
175. Koppers H., «Colliery Guardian», 10, 1933.
176. Эйлер В. А., Очистка доменного газа, перевод, Металлургиздат, 1933.
177. Смухнин П. Н. и Коузов П. А., Центробежные пылеотделители — циклоны, ОНТИ, 1935.
178. Егоров Н. Н. журн. «Химстрой», № 6, 1933.
179. Rosin, Ramler u. Intelmann, «V. D. I». № 18, 1932.
180. Егоров Н. Н. журн. «Химстрой», № 5, 1932.
181. Гурфинкель И. М.. Газовое дело, т. I, ч. 1 и 2, ОНТИ, ДНТВУ и НКТП, 1935.
182. Хейлигенштедт, Регенераторы, рекуператоры и воздухонагреватели, перевод, ОНТИ и НКТП СССР, 1933.
183. Лоханский И. И., Основы коксования и улавливания побочных продуктов, ОНТИ, 1937.
184. Варганов В. А. и Григорян Б. М., Приборы для сжигания жидкого топлива, Нефтяное из-во, 1930.
185. Гаусбранд Э., Выпаривание, конденсация и охлаждение, перевод, ГНТИ, 1931.
186. Пейсахов и Сосновский, журн. «Кокс и химия», № 5, 1934.
187. Уокер В., Льюис А. и Мак-Адамс В., Типовая химическая аппаратура, вып. 2, перевод, ОНТИ, 1934.
188. Таганов Н. И., журн. «Химическое машиностроение», № 2, 1936.
189. Mach E., «Forschungsheft», 375 (приложение к «Forschungsheft aus der Gebiete des Ingenierwesens», № 6, 1935).
190. Крендель А. С., журн. «Химстрой» № 7, 1934.
191. Бертельсман В. и Шустер Ф., Введение в техническую переработку газовых веществ, перевод, ОНТИ, 1936.
192. Thau A., Verschwelung von Braunkohlen und Steinkohlen, Halle a. F. 1927.
193. Шнеерсон Б. и Егоров Н., Электрическая очистка газов, ОНТИ, 1933.
194. Вейнер М, Электрическая очистка газов, НХТИ, 1930.
195 Котляров И. И., журн. «Кокс и химия», № 6, 1933.
196. Чулков Я. М. «Журнал химической промышленности», № 2, 1934.
197. Лукашев К. М. сборн. «Вопросы газификации твердых топлив», ОНТИ и НКТП, 1936.
198. Ногин К. И., Сухая перегонка дерева, ГНТИ, 1931.
199. Раковский В. Е. и Стрелков С. С., сборн. «Торф и его химическое использование», ОНТИ, 1935.
200. Деревягин А. А. журн. «Лесохимическая промышленность», № 5–6, 1934.
201. Нусинов Г. О. и Андрианов А. П., Мышьяковый процесс газоочистки, ОНТИ, 1937.
202. Thau A. «Gas und Wasserfach», № 3, 1934.
203. Нусинов Г. О., Методы улавливания серы из промышленных газов, ГНТИ, 1933.
204. Нусинов Г. О. журн. «Химия твердого топлива», 1937.
205. Salmar, «Industrial and Engineering Chemistry», № 2, 1934.
206. Гофтман М. В. и Аронов С. Г., журн. «Кокс и химия», № 1, 1933.
207. Гофтман М. В., Аронов С. Г. и Михельсон Э. М., «Журнал химической промышленности», № 8, 1934.
208. Thau A., «Gas und Wasserfach», 1931.
209. Deneko, «Gas und Wasserfach», № 9, 1934.
210. Кармазин В. И., журн. «Теория и практика металлургии», № 10, 1937.
211. Справочник по газовому делу, т. 1, перевод, ОНТИ, 1937.

☆

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

☆

А

А. В. С. 224, 225, 226, 229
Адамс 72, 73, 74, 121, 122, 123, 137, 138
Альнер 117
Альтмейер 58, 59
Американское газовое объединение (A.G.A.) 147, 148
Andrea 27
Арнд 62
Аррениус 46, 90
Арт 27, 280
Аугустин 78
Ауфгейзер 80, 81, 483
A. V. G. 23, 224, 419, 550
Ауэр 25

Б

Бабкок-Вилькокс 488
Баллей 30, 336
Бальке 503
Бамаг 307
Байер 522
Бах 370
Беджер 503
Бекер С. 74
Бекер Х. 80, 83
Белл 79, 100
Бендер и Фрембс 421
Бенье 17
Берль 506
Бергфельд 555
Бидерманн 23
Биль 360
Бильдт 21
Бишоф 15, 18, 65, 117
Бласс 26, 27
Блазиус 368
Блинов 88, 92, 93, 94, 108
Боне 78, 119, 157, 159, 434
Браун 23, 58
Брендер-а-Брандис 127, 141
Бриан 117
Бригант 117
Брук 18, 19
Брукман 22
Брум 81
Брюйер 69, 70, 136, 137, 141
Бубиаг-Дидье 26, 29
Будуар 100, 136
Бунте К. 76, 128, 440
Бурдит 30
Бурке 88, 89, 90, 91

В

Ваагe 31
Вант-Гофф 35, 45
Варганов 488
Вард 147, 162
Вартенберг 65
Введенский 186
Веймаут-Толь 369
Вейс 76, 166
Вельман 21, 99, 230, 241, 255, 256, 260, 392
Вельман-Галуша 21, 244, 245, 334, 450
Вельтон 24
Вендт 100, 157
Венцель 89
Verity 20, 205
Верморели 488
Виаг 26
Вилькокс 488
Вильсон 18, 59
Виндетт 168, 169, 254
Винклер 19, 22, 26, 29, 30, 59, 99, 100, 109, 290, 332, 336, 338, 341, 342, 343, 344, 450
ВИТГЭО 470
Вниги 39, 345
Войд 147
Вондрачек 446
Вюрт 315, 316, 317, 319

Г

Габер 39, 117, 118, 121
Газмонтажпроект 219, 231, 237
Газогенераторстрой 226, 231, 243 488, 539, 558
Газоочистка 532, 533, 538
Ган 116, 117
Гарлен 23
Гаррис 120, 121
Гау-Бабю 312
Гаусбранд 49

Гвоздь 123, 124, 134, 281, 284, 255, 287
Гейслер 432
Геллер 28, 29, 30, 209, 290, 293, 336, 337, 338, 339
Гельмгольц 37
Gelsenkirchener Bergwerk 319, 320
Гемпель 29
Георс-Мариенхютте 318, 319, 320
Геринг 19
Герцберг 30, 337
Гесс 37
Гец 19, 224, 229
Гиббс 191
Гиллебранд 28, 29, 290, 291, 292
Гильгер 221, 222, 229
Гинсельман 422
Гирдлер 579
Гиссен 127
Гичкок 124, 138
Глединг 160, 162
Глинчлей 499
Глууд 572
Говард 21, 250, 251
Гонкрафт 19
Горман 22
Горстман 166
Гофман 134, 138
Гофф 170
Грангер 25
Грау 441, 443
Гребе 19
Грефе 435
Григорьев 488
Гродзовский 85, 86, 101, 163, 166, 188
Грум-Гржимайло 363, 364
Грю 29, 294
Губман 177
Гульдберг 31
Гумфрей 145
Гумфрей и Гласго 25, 308

Д

Даннеберг и Квандт 474
Даннерт 25
Даусон 17
Дахрост 19, 274
Деви 380
Девис 24, 88, 90, 91, 92, 94, 96, 103
Дейц 22, 223, 231, 264, 522
Дельвик 25, 51, 144, 145
Дельвик-Флейшер 25, 26, 27, 309
Демаг 223, 224
Денеко 103
Дент 67
Деревягин 558
Дессемонд 18
Джонс 71
Джорж 21
Дидье 29, 293, 294
Диксон 80
Динглер 23, 522
Дитгельм 62
Дитцель 130, 137, 138
Доброхотов 229, 368
Дольх М. 130, 132, 137, 138
Дольх П. 117, 123, 133, 134 138
Донаван 15
Дорр 517
Драве 29, 175
Дуфф 18, 21
ДУХИ 348, 350, 353, 354
Дюквезен 504
Дюлонг 445

Е

Ёлинек 62
Ерк 482
Europeische Wassergas A. G. 25, 26, 27

З

Зайденшнур 75
Зелиге 16
Зигель 65
Зикель 19
Зорге 527

И

I. G. Farbenindustrie A. G. 24, 26, 338, 342, 568
ICT 65
Ингл 30
Институт азота 30, 101, 163, 181, 327, 344
Институт высоких давлений 183
Институт инженеров-газовиков 138, 145, 285
Инсторф 75, 129, 558
Иобард 16
Истман 117, 118

К

Карелин 430
Каржавина 106
Каро 23
Кармазин 163, 172
Карриер 499
Каундг 20
Квандт 474
Кейтс 491
Келлер 117, 118
Кениг 560
Керпели 19, 208, 217, 218, 221, 229, 230, 231, 335,
Кертинг 407, 487
Кетхум 19
Кин 76, 441
Кинг 71
Кириченко 349, 351
Кирхгам 15, 76
Кирхгофф 36, 37, 49
Китсон 19

Клаусс 30
Клемент 72, 73, 74, 121, 122, 123, 137, 138
Клецер 30
Кобб 67, 76, 126, 127, 139, 434
Ковард 59
Ковач 134, 138
Коен 488
Kohle und Erz 322
Коллегаев 430
Коллер 224
Кольвиц 130, 187
Копперс 24, 553, 560, 572
Коревар 105
Котрелль 24
Коузов 472
Крамер 280
Красный 345
Крегер 132, 137, 138, 140
Крейз 303
Крейзингер 78
Кремер 27
Крисман 285
Кузнецов 350
Куринов 345

Л

Лаваль 19, 489
Лавуазье 15
L'air chaud 18, 321, 323
Ланг 120, 137
Лангло 119
Лангмюр 68, 82, 83
Лебо 24
Ле-Нобель 127, 137, 441
Лер 134, 138
Лерман 23
Ле-Шателье 38, 62, 109, 177
Лигель 18
Лимн 501, 502, 503, 509,
Лимн-Рамбуш 228, 229, 231, 277, 332
Линде 29
Линк 268
Линке 67
Лове 25
Лонг 119, 137
Лоран 15
Лурги 30, 310, 536
Люис 44, 59, 65, 116, 118
Лют 444

М

Мак-Кеффери 311, 312
Майер 62, 108, 433
Майерс 68, 69, 70, 108
Манн 24
Маришка 20, 413, 414
Марковский 441
Маркони 22
Мартин 71
Матвеев 348, 354
Маурер 65, 117
Мейер 58, 59, 71, 81, 83, 84, 85, 86, 87
Мекки 160, 162
Меллер 19, 20
Менделеев 346, 446
Михеев 345
Монд 8, 16, 23, 332, 461, 463, 551, 561, 562
Монкгауз 434
Морган 18, 99, 207, 216, 221, 230 254, 260
Моррис 410
Мюллер 19

Н

Науман 118, 120, 137
Невиль 138
Незе 22
Нейман А. 87
Нейман Б. 117, 118
Нейман К. 100, 132, 137, 138, 149
Нернст 40, 41
Нуссельт 88, 89, 481
Ньютон 118
Ньютон-Чемберс 408

О

Оберто 15
Овиц 78
Ольшевский 22
Омбек 368
Оргхим 108
Осанн 60
Оствальд 193

П

Паркер 95, 97
Парр 432
Патчеке 134, 138
Пауэр-Газ 243, 408, 410
Пейсахов 494, 501
Пекле 98
Пеклер 183
Пекстон 126, 127, 434
Пелуз 526, 527
Петер 245
Петри 524
Пинч 18, 23, 298, 302, 320, 332, 335, 406
Пинч-Гиллебранд 290
Пистор 118, 120, 137
Подземгаз 346, 347
Поль 368
Поуэль 432
Прингг 59
Пти 24
Пфейфер 16, 334

Р

Рамбуш 273, 312, 415, 417
Рамзей 346, 434

Рейерсон 69, 70, 136, 137, 141
Рейндерс 148
Рейнольдс 368, 467, 470
Реман 18, 227, 322
Рендл 44, 59, 65, 116, 118
Рид 61, 62, 72, 81, 108, 160, 162
Ридель 73, 119
Риксон 312
Рихард 117
Ричард 121
Ричи-Гоцо 19, 331, 332
Рише 22, 262
Робинзон 491, 502
Розенбауг 492
Ройстер 311
Рудей 124, 138
Руссель 61, 78, 116
Рут 394, 395

С

Сальманг 434
Сапожников 438, 459
Seabord By Product Coke & Co 24
Sepulchre 18
Сиборд 24, 569, 574, 575, 576, 577
Сименс 16, 18, 22, 23, 207, 210, 214, 215
Сименс и Шуккерт 536
Синнет 71
Скафа 348
Скотт 141
Смирнов 238, 239
Смит 29, 79, 318
Смиттельс 80
Смухнин 472
Societe Houillieres de St Etienne 320
Сосновский 494, 501
Стадников 428, 438
Стассано 292
Стантон 98
Стокс 467, 469
Стронг 26
Сюид 555
S. F. H. 78, 315
Shorples Speciality Co U. S. A. 551

Т

Тайлокс 24, 564, 572, 573, 574, 577
Тальбот 21
Тау 528
Твайт 18, 22, 23
Тейлор 17, 19, 138
Тейсен 23, 324, 509, 513, 514, 515, 516, 521, 539, 540, 541, 544, 545
Тернер 76, 441
Террес 164, 135, 136, 138, 458, 461
Тиле 127, 308
Тимм 27, 336
Тома 13
Томсон 23
Тон 349
Траверс 81
Трейер 488
Тренклер 109, 226, 332
Тулли 27
Тью 88, 90, 91, 92, 96, 108

У

Уайт 16, 118, 140, 166, 167
Уиллер 61, 62, 72, 81, 108, 157, 159, 434, 503
Уитвелл 286, 287
Уитман 491

Ф

Фабер-де-Фор 15
Фальк 77, 78
Фальке 62, 65
Фаруп 30, 124
Федоров 350
Фельд 311, 504, 520
Феррокс 24, 564, 569, 574, 577
Ферстер 432
Ферфер 120, 138
Фик 52
Филипон 18
Филиппов 348
Фингаз 132, 137, 138, 140
Фишер 42, 66, 67, 77, 288, 293, 294 298, 435, 436, 440
Fichet & Hertey 18, 315
Флейнер 297
Флейшер 25
Флир 167
Фокс 76, 149, 166
Фон-Ален 87
Фонтана 15
Фостер 435
Франк 23
Франк-Каро 562
Freitag-Metzler 524
Фрид 59, 117
Фрон 443
Фрост 65, 183, 186
Fuel Researéh Board 145
Fusion et Voltisation 18, 323

Х

Хайкина 88, 93, 94, 106
Харвей 23
Хаслам 61, 78, 116, 124, 126, 127, 138, 160, 162
Хекинг 524
Хескинс 72, 73, 74
Хивонен 81, 83, 108
Хилькер 525
Хирт 22, 336
Ховард 119
Хоттел 88, 90, 91, 92, 94, 95, 96, 97, 108
Хоурд 78
Хютиг 141

Ц

Цан 18
Циммерман 76
ЦКТИ 411
Цшоке 23, 522

Ч

Чаг 82, 83
Чапман 21, 99, 163, 203, 225, 229, 242, 254, 257, 258, 259, 260, 301, 391, 392
Черазоли 175
Чуханов 85, 101, 106, 107, 163, 165, 166, 188

Ш

Шак 481
Шашкин 345
Шварц 23
Шварц-Байер 522
Шенк 58, 59, 60
Шенфельдер 572
Шенч 26
Шмидт 29, 294
Шорин 38
Шпецлер 252, 253
Шраубе 62
Штарке 354, 365
Штейнбарт 504
Штендер 480
Штрахе 25, 26, 27, 28, 109, 143, 144, 145, 147, 149, 279, 297, 309, 441, 443
Штредер 419, 525, 526, 555
Шульц 118
Шуман 88, 89, 91

Э

Эбельман 15, 17, 22, 314, 315
Эванс 118
Эдж 67
Эйкен 58, 81, 83, 117, 118
Эйнон-Эванс 387, 392
Эльга 536
Энгельс 117
Энке 397, 399
Энтвисль 110, 162
Эреверт 23

Ю

Юз 19, 21, 217
Юнг 434
Юптнер 66
Юргес 498

Я

Ягода 109, 143, 144, 148, 149
Якоб 482

☆

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

☆

А

Автоматические питатели см. Питатели
Автоматическое управление 27, 272
Автоматические шуровочные приспособления. См. шуровочные приспособления.
Азот — выделение из топлива 433
— содержание в газах 58, 111, 181, 182, 234
— содержание в топливе 431, 433
Аккумулятор пара 423
Аммиак — влияние водяного пара на выход 434
— выделение 434, 461
— содержание в газе 561
— улавливание из газа 23, 158, 461, 561
Антрацит — данные по газификации 8, 232, 233, 234
— интенсивность газификации 232, 279
— классификация 431
— очистка газа из А. 464, 510
— применение для газификации 451, 455, 456
— реакционная способность 72, 448, 458
— свойства 428, 451, 455, 456
— состав 431
— состав газа из А. 8, 234
— схемы установок для газификации 464, 510
Аппарат Котрелля см. Электрофильтры

Б

Башни коксовые 380
Бедный газ 5
Бимолекулярные реакции 45
Богатый газ 5
Богхеды 426, 427, 428
Брикеты 425
Бурый уголь — выход продуктов при термической обработке 8, 435
— данные по газификации 8, 232, 233, 234, 449, 455
Бурый уголь — интенсивность газификации 232
— классификация 426, 427
— очистка газа из Б. у. 542, 544
— применение для газификации 451, 453, 455, 457, 458
— реакционная способность остатка 75, 135, 137, 440, 458
— свойства 426, 427, 449, 451, 453, 455, 458
— состав 431
— состав газа из Б. у. 8, 234
— схемы установок для газификации 542, 544

В

Вентиляторы — исследование работы 393, 395
— к. п. д. 393, 394, 395, 397
— привод 397
— производительность 395, 397, 398
— расход энергии на В. 393, 395, 398
— ротационные 394
— центробежные 392
Взрывы в воздухопроводах 401
— в газогенераторах 423
— в газопроводах 363, 378
— в электрофильтрах 538
Витрит 427, 428
Влажность — газа 463, 464, 476, 478
— насыщение водяным паром газа 477
— смолы 540
— топлива, значение 7, 452
— топлива, использование 262, 552
— топлива, содержание 431, 452
Вода — очистка — см. Очистка сточных вод
— охлаждающая, использование 417
— подогрев 410
— расход 415, 507, 510, 514
Водород — выделение из топлива 57, 435
— выделение из газа 6, 579
— содержание в газах 8, 149, 171, 176, 182, 186, 234
— содержание в топливе 428, 431
— реакции с углеродом 58, 183

Водяной газ — влияние высоты слоя топлива — см. Топливо
— влияние давления — см. Давление
— влияние катализаторов — см. Катализаторы
— влияние скорости пара 121, 122, 123, 126, 136, 144
— влияние температуры — см. Температура
— выход 8
— генераторы для получения — см. Генератор водяного газа
— загрузка топлива 231
— интенсивность газификации 279
— использование тепла 276, 407
— определение 55
— получение из топлив с высоким содержанием летучих 27, 279
— получение непрерывным путем 28, 289, 337
— применение 24
— равновесный состав — см. Состав газа
— развитие техники получения 26, 28, 30
— расчеты к процессу получения 148
— реакции получения 114
— с высоким содержанием водорода 282, 288
— соображения о ходе процесса 154
— состав 148
— схемы установок 272
— тепловые балансы — см. Тепловые балансы
— удаление золы 276
— фазы цикла 272
— циклы 272
Водяной карбюрированный газ — карбюраторы 282
— получение 282
— развитие техники получения 25
— состав 8, 284
— топливо для карбюрации 283
Водяной пар — взаимодействие с серой 432, 462
— влияние избытка на процесс газификации 119, 120, 125, 127, 137, 157, 159, 165, 170, 282
— влияние на образование аммиака 434
— влияние скорости на процесс газификации 121, 122, 123, 126, 136, 144
— использование мятого В. п. 397, 423
— перегрев 410, 414
подача в генератор 20, 114, 156, 174, 386, 387, 402, 410, 415, 417
— получение в верхней части генератора 415
— получение из горячей воды 417
Водяной пар — получение в испарителях 415, 421
— получение в кожухах 206, 412
— получение в котлах 405, 407
— получение в крышках 206, 415
— получение из охлаждающей газ воды 417
— получение при использовании тепла отходящих газов печей 422
— развитие техники получения 20
— расход на дутье 404, 405
— расход на привод вентиляторов 398
— расход на инжектор 398, 403
— расход на шуровочные затворы 403
— реакции с углеродом 114, 127, 165,
— съем в котлах-утилизаторах 407, 409
— съем в крышках-испарителях 417
— съем в охлаждающих кожухах 414
Воздух — аппараты для нагнетания 386
— избыток при горении 7
— насыщение паром 403, 477
— объемный вес 56
— подача в генератор 55, 156, 386
— подогрев 17, 314, 401
— расход на дутье 112, 404
— реакции с углеродом 110
— увлажнение 403, 415, 417, 422
Воздухоподогреватели 401
Воздухопровод — конструкции 398
— потери напора в В. 398
— регулирование давления в В. 400
— скорости в В. 398
Воздушный газ — влияние давления — см. Давление
— влияние температуры — см. Температура
— выход 112
— исследование процесса получения 99
— определение 55
— расчеты к процессу получения В. г. 110
— реакции получения 61, 110
— соображения о ходе процесса получения 113
— состав 8, 110, 234
— тепловые балансы 233
Воздушный затвор — см. Затворы
Восстановление — зона 79, 161
Вращающиеся решетки 19, 27, 217
Вращающиеся фильтры — см. Смолоотделители
Высокоскоростная газификация 107, 165
Выход — газа 8, 404
— полукокса 8
— смолы 8
Вязкость — газа 476
— шлака 311

Г

Газ — бедный 5
— богатый 5
— вязкость 476
— генераторный, получение 5, 14
— генераторный, развитие техники получения 14
— генераторный, роль в энергетике 10
— генераторный, сравнение с др. 13
— доменный 5, 8, 15
— искусственный 5, 425
— классификация 5
— коксовальный 5, 8, 13
— молекулярные веса 56
— Монда 8, 23, 332, 461, 561
— насыщение влагой 477
— нефтяной 6
— облагороженный 6
— объемные веса 56
— осушка — см. Осушка газа
— очистка — см. Очистка газа
— парокислородный 6, 173
— первичный 435, 439
— подача на большие расстояния 364
— полукоксовальный 8,13
— преимущества использования 7
— применение 5, 10, 14, 24
— природный 5, 7, 8
— регенерирование — см. Регенерирование газов
— светильный 5, 13, 25
— сжигание 7
— силовой 17, 265
— смешение различных газов 14
— температура 464, 478, 541
— теоретический расчет состава газа 41
— теплотворная способность 9, 54, 111
— швелевания 5, 8
Газификация — влияние давления на Г — см. Давление
— влияние свойств топлива — см. Топливо
— влияние температуры — см. Температура
— высокоскоростная — см. Высокоскоростная газификация
— графическое представление процесса 190
— интенсивность — см. Интенсивность газификации
— определение 54
— под высоким давлением 177, 310
Газовые печи 10
Газопроводы — выбор диаметра 367
— дальние 364
— затраты напора 367
— кирпичные 356
— коррозия 359, 366
— металлические 358
— определение толщины стенок 369
Газопроводы — очистка 361
— падение температуры в Г. 357
— прокладка 365
— расположение 363
— расчет 362, 367
— скорости в Г. 362
— сопротивления от трения 367
— футеровка 357, 359
Генератор А. V. G. 266
— большого размера 229, 331
— Вельмана 255
— Вельман-Галуша 334
— Винклера 338
— ВНИГИ 345
— водяного газа 26, 272
— высокого давления 310
— высота слоя топлива в Г. — см. Топливо
— высокой производительности 331
— Вюрта 315
— Газмонтажпроекта 277
— Геллера 337
— Георгс-Мариенхютте 318
— Геца 224
— Гиллебранда 290
— данные о работе — см. Данные о работе
— Дахрост 214
— двойного водяного газа 295, 297
— Дейца, сдвоенный 262
— Демага 224
— диаметр 229, 331
— Дидье 293
— для пылевидного и мелкозернистого топлива 333
— классификация 197
— Kohle und Erz 322
— Koppers 323
— Лурги 310
— Маришка 413
— Монда 562
— Моргана 260
— обращенный 262, 269
— определение 54
— Пинча, кольцевой 332
— Пинча — Гиллебранда 290
— Пинча с выпуском жидкого шлака 320
— процессы в верхней части 60
— расположение 200
— распределение зон 55
— Ремана 322
— Ричи-Гоцо 332
— с автоматическим питателем 241
— с внутренней ретортой 265
— с вращающейся решеткой 217
— с выпуском жидкого шлака 17, 310
— с выпуском жидкого шлака и швельшахтой 322
— с газификацией на поду 208
— с горизонтальной решеткой 209

нератор с двойной решеткой и использованием фенольных вод 227, 417
— с двумя зонами горения 263
К. п — с естественной тягой 199
— с железобетонным кожухом 205
— с искусственным подводом дутья 200
— э
Кам — с использованием смол 265
— с керном 281, 301
— с круглой решеткой 216
— с крышеобразной решеткой 214
— с механическим шуровочным приспособлением 253
— с наклонной решеткой 210
— с обращенным движением газов 262, 269
— с перегородкой 213, 262
— с отделенной швельшахтой 268
— с подводом продуктов сухой перегонки под колосники 263
К — с отсасыванием газа 200
К — с разложением смол 261
— силового газа 200, 262, 268
К — со ступенчатой решеткой 210
К — со швельшахтой двойного водяного газа 297
— со швельшахтой с двумя отъемами 267
— со швельшахтой с одним отъемом 266
К — S. F. H. 315
— Сименса 210
Ки Стассано 292
— тепловые балансы — см. Тепловые балансы
— транспортный — см. Транспортные генераторы
— Тренклера, многокамерный 332
— форма 200
— футеровка — см. Футеровка
— Чапмана 257
— Штрахе 296
— Хирта 336
— Эбельмана 314
Глинозем — влияние на плавкость золы 311
— влияние каталитическое 77, 87, 141
— влияние на свойства огнеупорных материалов 203
Горение — атмосфера при Г. 7
— зона — см. Зона
— избыток воздуха при горении газа 7
— углерода, механизм процесса 79
Гребок Моргана 260
Гумусовые угли 428

Д

Давление — в генераторах 386
— в электрофильтрах 538
— влияние на процесс газификации 66, 111, 148, 177
Давление — газификация под высоким Д. 177, 310
— дутья 386
— пара 402
— потери в скрубберах 504
— потери в трубопроводах 367, 398
— потери в электрофильтрах 534
Данные по газификации различных топлив 232
Данные о работе аппаратов для очистки газа от сероводорода 568, 571, 575, 577
— от смолы 521, 524, 525, 536
— от пыли 474
Данные о работе вентиляторов 393
— генератора большого размера 332
— генератора Винклера 110, 341
— генератора водяного газа 272, 279, 281, 284
— генератора высокого давления 180, 310
— генератора Геллера 338
— генератора Гиллебранда 291
— генератора двойного водяного газа 297, 306
— генератора на пылевидном и мелкозернистом топливе 334, 337, 341, 345
— генератора с вращающейся решеткой 110, 232, 236
— генератора с выпуском жидкого шлака 110, 314
— генератора с горизонтальной решеткой 232
— генератора с механическим шуровочным приспособлением 110, 168, 232, 254
— генератора с неподвижной решеткой 232
— генератора с решетками большого сопротивления 334
— инжекторов 392, 398
— испарителей 416, 417, 422
— котлов-утилизаторов 405, 407
— охлаждающих кожухов 413
— распылителей 488
— скрубберов 492, 507
— установок Монда 562
Двойной водяной газ — генераторы — см. Генератор
— использование тепла 297, 308
— непрерывное получение 309
— подвод дополнительного тепла в швельшахту 305
— повышение теплотворной способности 308
— получение 295
— развитие техники получения 24
— состав 8, 297
— установки 296
Двойной карбюрированный газ — способы карбюрации 301
— установки 302

Двухзонный генератор — см. Генератор
Дезинтеграторы — см. Смолоотделители
Дисковый промыватель Штредера 525
Диффузия газов 50
Диффузия — зависимость скорости реакции от Д. 50
Добавка пара к дутью — влияние 156, 170, 174, 181
— контроль 403
Добавки неорганические — см. Катализаторы
Доменный газ 5, 8, 15
Древесина — выход продуктов при термической обработке 8
— выход уксусной кислоты 554
— данные по газификации 232
— интенсивность газификации 232
— очистка газа из Д. 542
— свойства 450, 452, 454, 458
— состав 431
— состав газа из Д. 8
— схемы установок для газификации 542
Древесный уголь — выход 8, 435
— реакционная способность 440, 458
Дурит 428
Дутье — подогретое — см. Подогретое дутье
— распределение 208, 215, 216, 229
— секционная подача 216, 221, 229

Е

Естественная тяга 199

З

Загрузочный конус 240
Загрузочные приспособления — автоматические — см. Питатели
— развитие 20
— ручные с двойным гидравлическим затвором 239
— ручные с двумя клапанами 235
— ручные с одним клапаном 231
Задвижки 377
Закон действующих масс 32
— Кирхгоффа 36
Заполнение скрубберов 484
Затворы — смотровых и шуровочных отверстий 252
— шахт 207
Зола топлива — влияние каталитическое на реакционную способность топлива 439
— влияние плавкости З. на процесс газификации 454
— плавкость 311, 453
— содержание в топливах 431, 454
— состав 430
— температура плавления 431, 454
— характеристика плавкости 453
Золоудаление — влияние требуемого давления дутья на З. 228
— жидкое 310
— зависимость от свойств золы 454
— механическое 216
— мокрое 207
— развитие техники З. 18
— ручное 208
— с помощью шиберов 332
— сухое 207, 228
Зольность топлив, значение 453
Зона — восстановления 79, 161
— высота отдельных З. 168, 232
— газификации 59
— горения 79, 160, 168
— подсушки 55
— реакционная 59
— сухой перегонки 55, 168, 232

И

Изоляция — газопроводов 359
— генераторов 202
— электрофильтров 533
Изобара реакции 38
Изотерма реакции 33
Изохора реакции 38
Инжекторы — данные о работе 392, 398
— конструкция 387
— применение 387
— расчет 388
— расход пара в И. 392, 398
— регулирование 388
— экономичность 387, 392, 398
Интенсивность газификации топлив в генераторах различных типов 54, 232, 279, 297
— влияние свойств топлива 449, 458
— влияние температуры реакционной зоны 113, 155 170
Искусственное дутье 199
Испарители — Бендер и Фрембс 421
— котлы 405
— крышки 415
— регенеративные 417
Использование тепла — см. Тепло

К

К. п. д. — вентиляторов 393, 394, 395, 397
— газовых печей 10
— генераторов 113, 150, 154, 233, 279, 285, 291, 297, 344
— компрессора 271
— котлов-утилизаторов 405, 410
— процесса получения водяного газа 151, 154, 279
— процесса получения воздушного газа 113, 233
— процесса получения смешанного газа 233
К. п. д. установок 279, 285, 286, 287, 291, 298, 303, 317, 319, 322, 338, 344
— электрических печей 10
Каменный уголь — выход продуктов при термической обработке 8, 435
— данные по газификации 232
— интенсивность газификации 232
— классификация 426
— мокрая очистка газа из К. у. 542
— пластометрическое испытание 438
— свойства 451, 455, 456
— состав 431
— состав газа из К. у. 8
— спекание 436
— схемы установок для газификации 464, 544
Каплеуловители 522
Каскадные холодильники — см. Скрубберы
Карбюрация 282, 286, 301
Катализаторы — влияние на восстановление CO_2 60, 67
— влияние на образование метана 58
— влияние на реакции получения водяного газа 116, 118, 124, 133, 135, 138
Катализаторы — влияние на скорость реакций 50
Кислород — выделение из газа 579
— реакции с углеродом 61
— содержание в газах 8, 234
— содержание в отходящих газах печей 187
— содержание в топливе 431
Кислородное дутье 173
Клапаны — высокого давления 377
— для включения 371, 372
— для регулирования количества газа 371, 372
— для чистки 380
— задвижки 377
— классификация 371
— обратные 377, 400
— паровой трехходовый 381
— перекидные рукава 372
— предохранительные 371, 378
— с гидравлическим затвором 372
— тарельчатые 373
— установок водяного газа 272
— шиберы 372
Кларит 428
Кожухи генераторов — железобетонные 205
— конструкция 204
— охлаждающие 412
Кокс — данные по газификации 232, 279, 458
— очистка газа из К. 464, 510
— получение 12, 425, 439
— реакционная способность 439, 458
— свойства 439, 456, 459
Кокс — состав 439
— состав газа из К. 8, 234
— схемы установок для газификации 464, 510
Коксовальный газ 5, 8, 13
Коксование 12, 435, 439
Коксуемость, метод определения 438
Комплекс — см. Углеродно-кислородный К.
Колосниковые решетки — вращающиеся 217
— высокого давления 230
— неподвижные горизонтальные 209, 224
— неподвижные круглые 216
— неподвижные крышеобразные 214
— неподвижные наклонные 210
— неподвижные ступенчатые 210
— привод 218
— расход энергии на вращение 220
— с брусом 224
— фрезерные 224, 230
— центральные 230
— эксцентричные 221
Компенсаторы 362
Компрессоры 370, 386, 393
Константы равновесия реакций
— вычисление 32, 43
— данные по К. р. отдельных реакций 64, 66
— зависимость от температуры 37
— понятие о К. р. 32
Коррозия — газопроводов 359
— охлаждающих кожухов 206, 413
— подогревателей 424
Котлы-утилизаторы — в установках водяного газа 407
— в установках смешанного газа 405
— конструкция 405
Кремнекислота — влияние на свойства золы 311
Крышки генераторов 204, 415

Л

Летучие — влияние на качество газа 55, 456
— выделение из топлива 56, 435
— содержание в топливе 431, 435
Лом Вельмана 255
Лучеиспускание — пламени 464

М

Максимальная работа реакции 33
Металлы — получение чугуна в генераторах с жидким шлакоудалением 314
— улавливание цветных металлов 323
Метан — взаимодействие с газами 57
— влияние катализаторов на условия образования — см. Катализаторы
— выделение из газа 463, 579
— выделение из топлива 56, 435

38* 337/1

Метан — константа равновесия реакции образования 58, 65, 186
— образование 59, 183
— равновесные концентрации 58, 186
— реакции образования 57
— содержание в газах 8
Механические генераторы 216, 254
Мешалка Чапмана 257
Молекулярный вес газов 56
Мономолекулярные реакции 45, 46
Мультициклоны 474

Н

Насадка воздухонагревателей 401
— карбюраторов 282
— пароперегревателей 410
— скрубберов — см. Заполнение скрубберов
Нефтяной газ 5, 8

О

Объемный вес газов 56
Облагороженный газ 6
Обратные клапаны — см. Клапаны
Огнеупорный материал 201, 203
Окисление угля 444
Окислы железа — влияние каталитическое 60, 71, 76, 139, 141
— влияние на огнеупорный материал 204
— влияние на плавкость золы 313, 454
Окись углерода — влияние катализаторов на реакции получения 60, 76
— выделение из топлива 55, 56, 435
— выделение из газа 464, 579
— константы равновесия реакций образования 64, 66
— образование 79
— содержание в газах 8, 66, 111, 149, 171, 176, 182, 184, 234
Осушка газа — аппараты для О. г. — см. Охлаждение газа
Очистка газа в газопроводах 356
— данные о работе очистительных установок — см. Данные о работе
— комбинированная 564
— мокрая бессмольного газа 510
— мокрая смолистого газа 544, 547
— от аммиака 463, 561
— от пыли — см. Пылеуловители
— от сероводорода мокрая: способ Глууд-Шенфельдера (аммиачно-содовый) 572
— — способ Сиборда (содовый) 574
— — способ Тайлокс (мышьяковый) 572
— — способ Феррокс (железо-содовый) 569
— — от сероводорода сухая: активированным углем 568
— — в башенных конструкциях 567
— — в ящиках 564
— — от смолы 518
Очистка газа — от углекислоты 177, 453, 578
— сухая 464
— тонкая 513
— цель 462
— электрическая — см. Электрическая очистка
Очистка сточных вод — от пыли 515
— от фенолов 552
Охладители — см. Скрубберы
Охлаждающие кожухи — водяные и пароводяные 206, 412
— назначение 206
— потери тепла в О. к. 414
— съем пара 414
— тепловой баланс 414
— чистота воды для О. к. 413
Охлаждение — воды 419
— газа в газопроводах 357, 358
— газа в скрубберах 489
— газа в поверхностных холодильниках 478
— газа, протекание процесса 489
— газа, расход воды 507
— цель О. 476

П

Паровое хозяйство 422
Паровой затвор 252
Паровоздушная смесь — насыщение 403, 476
— перегрев 403
— регулирование соотношения 403
Парокислородный газ 6, 173
Пароводяная рубашка — см. Охлаждающие кожухи
Парокислородное дутье — опыты и данные 174
— расчеты 175
Пароперегреватели 410
Паросборник 412
Первичный газ 439
Питатели автоматические — Вельмана 241
— Газогенераторстроя 243
— генераторов водяного газа 247
— Говарда 250
— для крупнокусковых топлив 246
— развитие конструкций 20
— с промежуточным бункером 247
— Чапмана 242
Плавкость золы 311, 453
Побочные продукты — использование 10, 453
Поверхностные холодильники 478
Подземная газификация — опыты 350
— методы 347
Подогретое дутье 320
Полукокс — выход 8
— получение 12, 425
— реакционная способность 439, 458
— свойства 438

Полукоксовальный газ 8, 439
Полукоксование 12, 438
Предохранительные клапаны — см. Клапаны
Предохранительные сетки 380
Привод - вентиляторов 397
— компрессоров 370
— чаши 218
Принцип Ле-Шателье—Брауна 38
Промыватель – Бергфельда 555
— смоляной Фельда 504, 520
— Штредера 525
Пульверизаторы — см. Распылители
Пылевидное и мелкозернистое топливо – данные по газификации — см. Данные о работе генераторов
— преимущество применения 333
Пылеуловители—данные о работе — см. Данные о работе аппаратов для очистки от пыли
— дезинтеграторы—см. Смолоотделители
— камерные 465
— расчет 466, 470
— с перегородкой 465
— скрубберы — см. Скрубберы
— циклонные 465, 489
— электрофильтры — см. Электрическая очистка
Пыль — в газе 356, 448, 462, 466, 474
— в сточных водах 515
— виды 466
— влияние на процесс газификации 448
— предупреждение уноса из генераторов 244
— способы выделения 465, 466, 469
— теория выделения 467, 470
— тонкая очистка от П. 513

Р

Разъедание — см. Коррозия
Распределение статей тепла — см. Тепловые балансы
Распылители (форсунки) большой производительности — данные о работе — см. Данные о работе
— Кертинга 487
— принцип действия 487
Расход воды в аппаратах Тейсена 514
— воды в рубашках 415
— воды на охлаждение газа 507
— воды на охлаждение механического шуровочного приспособления 257, 261
— кислорода на процесс газификации 180
— пара в инжекторах — см. Инжекторы
— пара на воздуходувки — см. Вентиляторы
— пара на дутье — см. Водяной пар
Расход энергии на автоматические питатели 243
— энергии на вентиляторы 393, 395, 398
— энергии на компрессоры 370
— энергии на механическое золоудаление — 220
— энергии на механические смолоотделители — см. Смолоотделители
— энергии на шуровочные приспособления 257, 261
— энергии на электростатические смолоотделители — см. Электрофильтры
Расчет состава газа 41
Реакционная зона — определение 59
— подразделение 79
Реакционная способность топлива 439, 458
Регенерирование газа—применение 183
— расчет 188
Регенеративный газ 6, 183
Регенеративно-кислородный газ 6, 174
Ресурсы—энергетические 10
Решетки — см. Колосниковые решетки

С

Сажа — образование 57
Самовозгорание угля 444
Сапропелиты 426, 428
Светильный газ 5, 13
Свободная энергия реакций 35
Сера — поведение при газификации 431, 460
— превращения под влиянием температуры 432
— содержание в различных топливах 431
— разновидности в угле 431
Сернистые соединения — содержание в газе 8, 460
Сероводород—выделение из газа 463, 563
— образование 432
— содержание в газе 8, 460
— способы очистки газа от С. — см. Очистка газа
Силовой газ 17, 265
Скорости в воздухопроводах 398
— в газопроводах 362
— в генераторах 110
— в скрубберах 507
— истечения пара 390
— связь с затратой напора 367
Скорость реакции, — влияние катализаторов 50
— зависимость от давления 48
— » от диффузии 50
— » от температуры 45
— » от величины и характера поверхности 48
— понятие о С. р. 44
— уравнения С. р. 46

Скрубберы -- данные о работе — см. Данные о работе
— двухступенчатые 417
— Дюквезена и Штейнбарта 504
— заполнение 484
— каскадные 501
— Лимна 501
— определение расхода охлаждающей воды 489
— процесс охлаждения — см. Охлаждение газа
— размеры 485, 507
— распределение воды 486
— расчет 491, 498, 502, 507
— с насадкой 491
— с пульверизаторами 497
— скорости в С. 507
Скрубберы — смоляные 519
— сопротивление 504
— сухие 504
— тарельчатые 375
— трехступенчатые 418
— Фельда 504, 519
Сланцы — свойства золы 456
— состав 431
Смешанный газ — влияние давления — см. Давление
— влияние температуры — см. Температура
— высота слоя топлива при газификации — см. Топливо
— выход 8, 404
— интенсивность газификации 110, 232
— исследование процесса получения 157
— определение 55
— получение 156
— развитие техники получения 17
— расчет состава 170
— реакции получения 156
— соображения о ходе процесса 170
— состав 8, 170, 234
— тепловые балансы 433
Смола — выделение при газификации 56, 457
— выделение при коксовании 439
— выделение при низких температурах 265, 438, 457
— выделение при сухой перегонке 56, 265, 435
— выходы 8, 268, 457
— отделение от воды 548
— первичная 265, 438, 457
— разложение в генераторе 261, 265, 279, 301
— разложение в карбюраторе 301
— улавливание — см. Очистка газа
— хранение 548
— центрифуга для отделения 551
Смолоотделители — вращающиеся фильтры Петри и Хекинга 524
Смолоотделители — данные о работе см. Данные о работе
— дезинтегратор Тейсена 521
— каплеуловители — см. Каплеуловители
— механические аппараты Дейца 522
— механические аппараты Динглера 522
— механические аппараты Пелуз 526
— механические аппараты, принципы работы 520
— механические аппараты Теервольф 523
— механические аппараты Тейсена 521
— механические аппараты Цшоке 522
— механические аппараты Шварца 522
— механические аппараты Хилькера 525
— промыватель Фельда — см. Промыватель
— промыватель Штредера (дисковый) — см. Промыватель
— расход энергии 521, 524, 525, 535, 537, 539, 540
— скрубберы — см. Скрубберы смоляные
— фильтры вращающиеся см. Фильтры
— электрические — см. Электрофильтры
Состав газа — влияние загрузки 241
— влияние излишнего добавления пара 157, 159, 170
— влияние распределения дутья 100, 109, 113, 172, 229
— влияние свойств топлива 456
— влияние температуры 113, 148, 170, 181
— графическое представление 190
— данные по различным газам 5, 8, 234
— равновесный 63, 66, 148, 170, 175, 181, 183
— расчет 41, 170
Спекание угля 436
Сульфат аммония 434, 562
Сточные воды — см. Очистка сточных вод
Сухая перегонка — зона 56, 168, 232
— продукты 56, 435, 456
— процесс 435
— тепловой эффект процесса 441
Сухие скрубберы — см. Скрубберы

Т

Тарельчатые клапаны 373
Температура — влияние на процесс газификации 113, 154, 156, 171, 181
— влияние на процесс крекирования 284
— влияние на ход реакций 37, 45
— влияние на реакционную способность кокса 87, 126, 134, 440

Температура — газа при выходе из генератора 464, 541
— газа, поступающего в смолоотделитель 519
— падение в газопроводах 357, 358
— шлакообразования 453
Тепловой эффект реакций — зависимость от температуры 36
— понятие о Т. э. 35
— при постоянном давлении 36
— при постоянном объеме 36
Тепловые балансы — генераторов 233
— котлов-утилизаторов 410
— охлаждающих кожухов 414
Теплопередача — коэфициенты 481, 491, 498
Теплотворная способность отдельных газов 56
— технических газов 5, 8
— топлив 431
— углерода 61
Топливо — влажность 429, 431, 452
— влияние на качество газификации — влажности 452
— — выхода летучих 456
— — плавкости золы 453
— — прочности 450, 456
— — размера кусков 448
— — свойств коксового остатка 458
— — свойств при нагревании 456
— высота слоя в генераторе 232
— горючая часть 429, 431
— зольность 430, 431
— классификация 425, 426
— летучие 435
— минеральная часть 430
— обозначение составных частей 446
— определение 425
— органическая часть 430
— пересчеты составов 447
применимость для газификации 448
— развитие использования 22, 27, 30
— размер кусков 448
— реакционная способность 439, 458
— ресурсы 11, 12
— сопротивление слоя 386
— состав 431
— спекание 436
— сухая перегонка 435
— тепловой эффект процесса перегонки 441
— теплотворная способность высшая 444
— теплотворная способность, вычисление 445
— теплотворная способность, данные 431
— теплотворная способность низшая 444
— теплотворная способность, пересчеты 448
— шуровка 253
Торф — выход продуктов при термической обработке 8
— выход уксусной кислоты 554
— данные по газификации 8, 232
— интенсивность газификации 232
— очистка газа из Т. 465, 543
— применение для газификации 325, 327, 451, 452, 455, 458
— свойства 453, 455, 458
— состав 431
— состав газа из Т. 8, 234
— схемы установок для газификации 543
— реакционная способность остатка 75, 129, 458
Транспорт — газа 364
— топлива 451
Транспортные генераторы — конструкции 269
— назначение 268
— требования к Т. г. 268
Трение — потери от Т. 367
Тримолекулярные реакции 45, 47
Трубы пусковые 385
Турбовоздуходувки — см. Центробежные вентиляторы

У

Увлажнение воздуха — см. Воздух
Углекислота — взаимодействие с углеродом 62
— влияние катализаторов на реакции образования 76
— выделение из генераторного газа 463, 578
— выделение из топлива 435
— образование 61, 114
— регенерирование 187
— содержание в газах 8, 63, 66, 149, 171, 176, 182, 234
Углерод — в золе 449, 453
— взаимодействие с водяным паром 114
— горение 51, 54, 61, 85
— значение модификаций 49, 67, 72, 75, 87, 94, 104, 121—138, 177, 281, 440
Углеродно-кислородный комплекс 69, 81, 127
Угли — азот в У. 431, 434
— классификация 425
— коксуемость, метод определения 438, 459
— окисление и самовозгорание 444
— реакционная способность 67, 72, 75, 94, 104, 121, 135, 439, 458
— сера в У. 431
— смешение 451
— спекание 436, 459
Уксусная кислота — выделение при сухой перегонке 56, 553
— выделение из газа 554

Уксусная кислота — выходы 554
— предупреждение выделения 561
— улавливание в газогенераторных установках 555

Ф

Фенолы – выделение из газа 553, 555
— выход 554
— улавливание в газогенераторных установках 555
— улавливание из сточных вод — см. Очистка сточных вод
Фильтрационные мешки 466, 515
Фильтры — вращающиеся 524
— для пыли 466, 515
— Зорге 257
— коксовые 516
— со стеклянной ватой 528
— электрические—см. Электрофильтры
Флюсы 311
Форсунки — см. Распылители
Фрезерные решетки 224
Фузит 428
Футеровка — газопроводов 357, 358
— генераторов 203
— кладка огнеупорная — см. Огнеупорный материал

Х

Химическое равновесие—зависимость от температуры 37
— зависимость от давления 38
— изобара реакции 38
— изотерма реакции 33
— изохора реакции 38
— понятие о х. р. 31
— принцип Ле-Шателье — Брауна 38
Химическое сродство
— определение Х. с. 33
— понятие о Х. с. 33

Ц

Центробежные вентиляторы 392
Центробежные очистители — см. Дезинтеграторы
Центрифуга для отделения смолы 551
Циан 435
Циклоны — см. Пылеуловители
Циклы — см. Водяной газ
Циркуляционный газ — для подведения тепла 290, 305

Ч

Чаша генератора—привод 218

Ш

Шахта генератора—вращающаяся 255, 260
— затворы 207
— материал 200, 203
— охлаждение 206
— расположение 200
— устройство 20, 201
Швельгаз 8
Швельшахта — назначение 265, 297
— отделение от основной шахты 268
Швельшахта—подвод дополнительного тепла 305
Шлак — вязкость 311
— грануляция 329
— использование 314, 321
— образование 453
— состав 314
— свойства 311
— удаление 208, 210, 217, 225, 228, 310
Шуровочные затворы 252
Шуровочные приспособления — грей Моргана 260
— лом Вельмана 255
— мешалка Чапмана 257
— развитие 21
— штанга 261

Э

Электрическая очистка газов 528
Электрические печи 10
Электрофильтры — данные о работе см. Данные о работе
— оборудование 532
— пластинчатые 532
— применение 466, 513, 519
— принцип работы 528
— расход энергии 537, 539
— сравнение с аппаратами Тейсена 53
— трубчатые 532
Этан — распад 183
Этилен — выделение из топлива 56
— образование 183
— содержание в газе 59, 183

☆

ОГЛАВЛЕНИЕ

☆

Предисловие ко второму изданию 3

Введение (5 — 30)

1. Виды и классификация применяемых в промышленности горючих газов 5
2. Преимущества газообразного топлива 7
3. Роль генераторного газа в энергетике 10
4. Краткий исторический обзор развития техники производства генераторного газа. 14
Первые опыты получения генераторного газа (14). Практическое применение воздушного и смешанного генераторных газов (16). Практическое применение высококалорийного газа (24).

Глава I

Процессы, протекающие в газогенераторах, и получение генераторного газа (31 — 196)

. Физико-химические основы процесса газификации. 31
Химическое равновесие и закон действия масс (31). Химическое сродство (33). Тепловой эффект реакции (35). Зависимость химического равновесия от температуры (37). Расчет равновесных соотношений (41). Расчеты химического сродства при помощи абсолютного значения энтропии реагирующих веществ (43). Основы химической кинетики (44).
Сущность генераторного процесса 54
Общие понятия (54). Зона сухой перегонки (56). Зона газификации (59). Процессы, протекающие в верхней свободной части генератора и газопроводах (60).
3. Получение воздушного газа 61
Реакция $C+O_2=CO_2$ (61). Реакция $2C+O_2=2CO$ (61). Реакция $C+CO_2=2CO$ (62). Реакция $2CO+O_2=2CO_2$ (77). Исследование химизма процесса получения воздушного газа (78). Исследование влияния физических факторов на механизм процесса получения воздушного газа (88). Исследование процесса газификации на воздушном дутье (99). Расчеты к процессу получения воздушного газа (110). Соображения о ведении процесса получения воздушного газа (113)
4. Получение водяного газа 114
Реакция $C+H_2O=CO+H_2$ (115). Реакция $C+2H_2O=CO_2+2H_2$ (116). Реакция $CO+H_2O=CO_2+H_2$ (116). Реакция $2H_2+O_2=2H_2O$ (118). Исследование взаимодействия углерода и водяного пара (119). Исследование процесса газификации на паровом дутье (142). Расчеты к процессу получения водяного газа (148). Соображения о ведении процесса получения водяного газа (154). Продолжительность циклов и отдельных стадий и последовательность последних (155).
5. Получение смешанного газа 156
Расчеты к процессу получения смешанного газа (170). Исследование процесса газификации на паровоздушном дутье (157). Соображения о ведении процесса получения смешанного газа (170).
6. Газификация с помощью кислорода 172
Исследование процесса газификации на парокислородном дутье (174). Расчеты к процессу получения парокислородного газа (175).

7. Газификация под высоким давлением 177
Исследования процесса газификации под высоким давлением (180). Расчеты к процессу газификации под высоким давлением (180).
8. Газификация с помощью углекислоты 183
9. Графическое представление процесса газификации. 190

Глава II

Классификация, устройство и расположение газогенераторов (197—355)

1. Газогенераторы с естественной тягой и с искусственным подводом дутья 199
2. Шахты газогенераторов 200
Формы и расположение генераторов (200). Основание, стены и свод (201). Огнеупорный материал для кладки (203). Кожух и крышка (204). Охлаждение стен и свода шахт (206). Затворы шахт (207).
3. Колосниковые решетки газогенераторов 208
Генераторы с газификацией на поду (208). Генераторы с неподвижной решеткой (209). Генераторы с механической решеткой (216).
4. Загрузочные приспособления 231
Назначение (231). Коробки с одним клапаном (231). Коробки с двумя клапанами (235). Значение загрузочного конуса (240). Автоматические непрерывные питатели (241). Приспособления для поддержания постоянного уровня слоя топлива, равномерного распределения топлива и предупреждения уноса пыли (244). Питатели для топлив с кусками больших размеров (246). Предупреждение пропуска газа загрузочными приспособлениями (246). Питатели генераторов водяного газа (247).
5. Затворы смотровых и шуровочных отверстий 252
6. Механические шуровочные приспособления 253
Устройства и преимущества (253). Шуровочный лом Вельмана (255). Мешалка Чапмана (257). Гребки Моргана (260). Шуровочные штанги (261).
7. Газогенераторы с разложением смол 261
8. Газогенераторы с использованием смол 265
9. Транспортные газогенераторы 268
10. Газогенераторы для получения водяного газа 272
Стадии цикла работы генератора и схемы установок водяного газа (272). Загрузка топлива и удаление золы (277). Данные о работе генераторов водяного газа и использовании тепла в них (279). Получение водяного газа из топлив с высоким содержанием летучих (279). Получение водяного карбюрированного газа (282). Данные о работе установок для получения водяного карбюрированного газа и использовании тепла в них (285). Получение карбюрированного водяного газа из топлив с высоким содержанием летучих (286). Получение водяного газа с высоким содержанием водорода (288). Непрерывное получение водяного газа (289).
11. Газогенераторы для получения двойного водяного газа 295
Принцип устройства (295). Данные о работе установок двойного водяного газа и использовании тепла в них (297). Получение карбюрированного двойного водяного газа (301). Подвод дополнительного тепла в швельшахту (305). Особые конструкции установок двойного водяного газа (307). Использование тепла в установках двойного водяного газа (308). Способы повышения теплотворной способности двойного водяного газа (308). Непрерывное получение двойного водяного газа (309).
12. Газогенераторы для газификации под высоким давлением 310
13. Газогенераторы с выпуском жидкого шлака . . . . . —
Принцип работы (310). Состав шлака и свойства золы (311). Процессы в горне (312). Применение подогретого дутья (314). Использование металла и шлака (314). Генератор Эбельмана (314). Генератор S.F.H. (315). Генератор Вюрта (315). Опыты Смита (318). Генераторы завода «Georgs Marienhütte» (318). Генераторы Пинча (320). Генераторы, работающие на подогретом дутье (320). Генератор Ремана (322). Генератор фирмы «Kohle und Erz» (322). Генератор фирмы «Koppers» (323). Использование генераторов с выпуском жидкого шлака для улавливания цветных металлов (323). Комбинирование процессов газификации и доменного в СССР (324). Опыты в СССР по плавке чугуна на торфе с дутьем, обогащенным кислородом (327). Грануляция шлака (329). Область применения и преимущества генераторов с выпуском жидкого шлака (330).
14. Газогенераторы высокой производительности 331
15. Газогенераторы для пылевидного и мелкозернистого топлива . . . 333
Преимущества применения мелкозернистого топлива и пыли (333). Применение мелкого топлива в генераторах обычных конструкций (334). Специальные конструкции генераторов для пыли и мелкого топлива (336). Генератор Геллера (337). Генераторы Винклера (338). Генератор ВНИГИ (345)
16. Подземная газификация углей 345
Методы подземной газификации (347). Данные о проделанных опытах (350).

Глава III

Подача газа (356—385)

1. Газопроводы и транспорт газа 356
Кирпичные газопроводы (357). Металлические газопроводы (358). Очистка газопроводов (361). Скорости в газопроводах низкого давления (362). Компенсаторы (362). Расположение газопроводов (363). Подача газа на большое расстояние и при разветвленной сети (364). Газодувки и компрессоры (370).
2. Клапаны и затворы 371
Классификация клапанов (371). Обычные конструкции клапанов для включения и регулирования количества газа (372). Клапаны высокого давления (377). Предохранительные клапаны (378). Клапаны для чистки (380). Клапаны установок водяного газа (381). Клапаны и трубы для пуска, продувки и выжига газа (385).

Глава IV

Подача воздуха и пара в газогенераторы (386—424)

1. Подача воздуха 386
Общие соображения (386). Инжекторы (387). Центробежные вентиляторы (392). Ротационные вентиляторы и компрессоры (394). Привод вентиляторов (397). Конструкция и оборудование воздухопроводов (398).
2. Подогрев воздуха 401
3. Получение и подача пара для газификации 402
Общие соображения о получении и потреблении пара (402). Котлы-утилизаторы в установках смешанного газа (405). Котлы-утилизаторы в установках водяного газа (407). Перегрев пара и подогрев питательной воды в установках водяного газа (410). Охлаждающие кожухи генераторов (412). Получение пара за счет охлаждения верхней части генератора (415). Регенеративные испарители (417). Использование тепла охлаждающей воды (417). Испарители Бендера и Фрембса (421). Получение пара за счет тепла отходящих газов тепловых установок (422). Оборудование парового хозяйства (422).

Глава V

Свойства топлива для газогенераторов (425—461)

1. Топливо, его состав и свойства 425
Классификация топлив (425). Состав топлива (429). Минеральная часть топлива (430). Сера угля (431). Азот угля (433). Сухая перегонка топлива (435). Спекание угля (436). Состав и свойства продуктов полукоксования (438). Состав и свойства продуктов кок-

сования (459). Реакционная способность кокса и полукокса (439). Тепловой эффект процесса разложения (442). Окисление и самовозгорание угля (444). Теплотворная способность топлива (444). Обозначения и пересчеты (446).
2. Применимость различных топлив для газификации 448
Размер кусков топлива (448). Влажность топлива (452). Зольность топлива (453). Свойства топлива при нагревании (456).

Глава VI

Очистка и осушка газа (462)

1. Общие соображения 462
2. Сухая очистка газа 464
Применение (464). Схемы установок (464). Пылеуловители (465). Выделение пыли из газа (466). Очистка под действием силы тяжести (466). Циклонные пылеуловители (469). Вязкость газа (476).
3. Осушка и охлаждение газа 476
Способы осушки (476). Охлаждение газа (478). Поверхностные холодильники (478). Скрубберы (483). Заполнение скрубберов (484). Распределительные приборы для воды (486). Распылители-пульверизаторы (487). Протекание процесса охлаждения газа и расход воды в скруббере (489). Скрубберы с насадкой (491). Скрубберы с пульверизаторами-форсунками (497). Каскадные скрубберы (501). Другие конструкции скрубберов (504). Сухие скрубберы (504). Сопротивление скрубберов (504). Практические данные о размерах скрубберов и расходе воды (507).
4. Мокрая очистка бессмольного газа 510
Схемы установок (510). Тонкая очистка (513). Выделение пыли из промывной воды (515).
5. Улавливание смолы 518
Аппараты для отделения смолы механическим путем (520). Электрическая очистка газа (522).
6. Мокрая очистка смолистого газа 541
Температура генераторного газа (541). Выделение из газа взвешенных частиц до и после смолоотделения (541). Схемы установок (543). Двухступенчатая очистка газа (547). Хранение смолы и отделение смолы от воды (548). Отделение смолы от воды с помощью центрифуг (551). Очистка сточных вод (552).
7. Выделение из газа уксусной кислоты и фенолов 553
Улавливание уксусной кислоты при сухой перегонке древесины (554). Улавливание уксусной кислоты и фенолов в газогенераторных установках (555). Предупреждение выделения уксусной кислоты (56).
8. Улавливание аммиака 561
9. Очистка газа от сероводорода 563
Содержание сернистых соединений в газе (563). Способы очистки газа от сероводорода (563). Сухая очистка газа (564). Мокрая очистка газа (569).
10. Удаление из генераторного газа углекислоты и других газов. . . 578

Указатель литературы 580
Именной указатель 585
Предметный указатель 590

☆

Редактор *А. А. Сержпинская* Техн. редактор *И. Стрелецкий*

Сдано в набор 27/I 1938 г. Подп. в печать 3/VIII 1938 г. Бум. 60×92¹/₁₆ 37³/₄ печ. л.+1 вкл. 1 печ. л. У. а. л. 48,9. 48 тыс. зн. в печ. л. Индекс С-1 Гизлегпром 3455. Заказ 1050. Тираж 5000 экз. Первый завод 3000 экз. Уполномоч. Главлита Б-22656.

1-я тип. Трансжелдориздата. Москва, Б. Переяславская, 46

R 423/39

№ по порядку	Район месторождения	Наименование месторождения	Пласт, марка, сорт и пр.	Условное обозначение марки	W^a % Среднее от—до	W^p % Среднее от—до	A Ср от
1	2	3	4	5	6	7	
27	Казахстан	Карагандинское .	Пласты, Нов. Верх. Мариана Ниж. Мар.	—	**2,1** 1,0—2,5	**7,0** 3,1—12,0	1 6,0
28		Берчогурское* . .	—	—	**1,5**	**1,7**	3
29		Ленгеровское . . .	—	—	**11,0** 7,5—12,3	**22,5** 13,5—28,7	1 11,4
30	Кузнецкий бассейн	Анжеро-Судженские копи . . .	—	—	**0,6** 0,4—0,7	**4,0** 2,0—6,4	7,0
31		Прокопьевские копи	—	—	**1,0** 0,5—1,2	**6,0** 2,0—9,0	2,5
32		Кемеровские копи	—	—	**1,0** 0,7—1,4	**8,1** 4,0—11,3	1 3,0
33		Ленинские копи. .	Коксовый	—	**1,8** 1,5—2,5	**6,0** 3,0—8,0	3,0
34		» »	Энергет.	—	**3,5** 3,2—4,0	**9,0** 8,0—14,0	6,0
35					**2,4**	**9,0**	1
36							
37							
38							
	То же				5160	6080	22,1
	»				6640		17,9
	»						

№ по порядку	Район месторождения	Наименование месторождения	Пласт, марка, сорт и пр.	Условное обозначение марки	Элементы характеристики: W^a % Среднее от—до	W^p % Среднее от—до	A^c % Среднее от—до	$S^c_{об}$ % Среднее от—до	S^c_a % Среднее от—до	C^c % Среднее от—до	H^c % Среднее от—до	$S^c_к$ % Среднее от—до	$S^c_{ор}$ % Среднее от—до	N^c % Среднее от—до	O^c по разности % Среднее	$Q^c_б$ Калорий Среднее от—до
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	А. Дрова		Хвойные	—	**7,0** 5,6—9,0	**30,0**	**1,0** 0,4—2,0	—	—	**51,0** 49,7—52,1	**6,15** 6,0—6,3	—	—	**0,6**	**42,25**	**4900** 4 700—5 050
			Лиственные	—	**7,0** 5,0—10,0	**30,0**	**1,0** 0,3—1,6	—	—	**50,5** 49,7—51,1	**6,1** 6,0—6,2	—	—	**0,6**	**42,8**	**4800** 4 700—4 970
	Б. Торф		—	—	**10,5** 7,3—14,6	**40,0** 24,3—59,4	**8,5** 1,4—44,4	**0,4** 0,1—2,0	**0,1**	**58,3** 53,4—61,5	**5,8** 5,2—6,2	**0,3**		**2,6** 2,3—3,3	**33,0**	**5650** 5 050—5 990
	В. Сланцы															
1	Ленинградская область	Веймарнское . . .	II и III пласты	—	**2,3** 0,9—4,0	**15,0** 7,0—30,0	46,2+12,3[1] от 39,8+9,4[1] до 49,3+16,2[1]	**0,9** 0,5—1,5	**0,1**	**75,2** 70,8—79,0	**9,1** 8,5—9,6	**1,9**		**0,3***	**13,5**	**8100** 7430—8800
2	Средняя Волга	Кашпирское . . .	—	—	**4,3** 3,2—6,5	**13,0** 5,8—25,0	**57,3+9,2**[1] от 50,9+7,0[1] до 61,7+12,7[1]	**5,1** 4,2—7,2	**0,4** 0,2—1,0	**71,1** 68,7—73,7	**8,5** 8,1—9,4	**14,0**		**1,6***	**4,8**	**7860** 7460—8230
3		Ундорско-Захарьев.	—	—	**6,3**	**13,0**	**63,2+7,3**[1]	**3,5**	**0,4**	**68,2**	**8,7**	**10,5**		**1,5**	**11,1**	**7200**
	Г. Ископаемые угли															
1	Ленинградская область	Подмосковный бассейн	—	—	**8,0** 5,6—12,3	**32,0** 20,4—42,0	**26,8** 22,5—38,3	**3,7** 2,0—5,9	**0,2** 0,1—1,3	**69,7** 64,8—71,3	**4,9** 4,4—5,4	**5,1** 1,8—3,4		**1,4** 0,9—1,7	**18,9**	**6750** 5980—7100
2		Боровичское . . .	—	—	**6,5**	**30,0** 21,5—34,0	**28,0** 19,5—33,4	**7,7** 3,7—13,0	**0,3***	**68,5** 65,5—73,0	**5,7** 5,2—6,3	**10,3**		**1,0***	**14,5**	**7230** 6900—7400
3	Карелия	Шунгит	—	—	**2,0**	**6,5** 2,0—10,0	**40,0** 35,6—46,8	**3,1** 0,3—6,5	**0,2***	**89,5** 85,7—93,1	**1,1** 0,7—1,6	**5,0**		**1,4***	**3,0**	**7600** 7450—7760
4	Печорский край	Неча	—	—	**9,9**	**20,8**	**33,9**	**0,4**	—	**72,0**	**5,0**	**0,6**		**1,6**	**20,0**	**6670**
5		Тальбей	—	—	**9,0**	**24,2**	**40,1**	**0,9**	**0,03**	**71,5**	**5,0**	**1,5**		**2,2**	**19,8**	**6670**
6		Заостренный . . .	—	—	**9,7**	**21,0**	**31,3**	**0,8**	**0,03**	**74,1**	**5,4**	**1,1**				
7		Варкутское	—	—	**1,3** 1,0—1,6	**6,0** 4,0—12,0	**11,9** 6,6—24,3	**0,7** 0,6—1,1	**0,05** 0—0,2	**85,6** 84,5—86,6	**5,3** 5,1—5,5	**0,7**		**19,4**		**7000**
8		—	Длинно-пламенный	Д	**5,2** 3,1—7,2	**13,0** 7,4—21,0	**11,2** 8,0—26,3	**3,6** 1,5—6,0	**0,2** 0,1—0,3	**77,3** 74,8—78,8	**5,4** 5,1—5,6	**3,8**		**2,4** 2,2—2,7	**6,0**	**8440** 8270—8600
9		—	Газовый	Г	**2,8** 1,0—4,8	**5,9** 2,4—18,6	**11,1** 7,0—24,2	**2,9** 1,1—6,0	**0,1** 0,1—0,3	**81,0** 78,5—82,7	**5,4** 5,0—5,5	**3,2**		**1,6** 1,2—2,0	**11,9**	**7800** 7500—8050
10		—	Паровичн. жирный	ПЖ	**1,1** 0,4—2,1	**3,2** 1,3—15,3	**11,4** 4,0—32,0	**2,5** 0,9—5,9	**0,2** 0,1—0,5	**84,6** 82,4—87,0	**5,2** 4,8—5,5	**2,6**		**1,6** 0,9—1,8	**8,8**	**8100** 7860—8400
11	Донецкий бассейн	—	Коксовый	К	**1,0**	**3,5** 2,0—8,0	**10,7** 6,0—25,0	**2,0** 0,8—5,5	**0,1**	**87,0**	**4,9**	**2,1**		**1,6** 1,4—1,8	**6,0**	**8470** 8220—8700
12		—	Паровичн. спекающ.	ПС	**0,8** 0,6—1,4	**3,5** 1,3—9,9	**9,7** 7,9—22,0	**2,1** 1,0—5,0	**0,1**	**88,5** 87,1—91,2	**4,6** 4,1—5,1	**2,2**		**1,5** 1,3—1,6	**3,2**	**8590** 8450—8700
13		—	Тощий	Т	**1,0** 0,4—1,8	**3,4** 1,4—12,1	**8,5** 2,0—13,7	**1,5** 1,0—2,5	**0,1** 0,03—0,1	**90,6** 89,4—92,4	**4,3** 4,0—4,6	**1,6**		**1,6** 1,3—1,9	**1,9**	**8590** 8410—8720
14		—	Антрацит [3]	—	**2,0** 0,9—4,6	**5,5** 2,3—17,0	**9,7** 1,3—23,6	**1,9** 0,8—5,5	**0,1**	**93,8** 91,3—96,1	**1,95** 1,4—2,8	**1,3** 0,1—6,0	**0,7** 0,5—1,0	**1,2**	**1,05**	**8620** 8500—8730
15		—	Антрацитовый штыб	АШ	**2,0** 0,8—3,5	**7,4** 2,0—15,4	**17,3** 11,5—24,6	**1,8** 0,8—5,5	**0,15** 0,04—0,6	**93,2** 91,1—95,4	**1,85** 1,5—2,9	**1,3** 0,2—6,0	**0,7** 0,5—1,0	**1,2**	**1,75**	**8200** 7970—8430
16	Крым	Бешуйское* . . .	—	—	**2,2**	**2,5**	**41,0**	**2,6**	**0,3**	**76,4**	**5,9**	**2,4**	**1,6**	**1,3**	**12,4**	**8100** 7720—8310
17	Украина	Александрийское [4] .	—	—	**10,0** 6,8—13,0	**55,0** 50,0—60,0	**29,0** 15,0—50,0	**4,4** 2,5—5,6	**0,4** 0,2—0,6	**66,4** 64,5—68,0	**5,9** 5,0—6,2	**2,0** 0,0—6,0	**3,6** 3,2—4,0	**0,7** 0,6—0,8	**21,4**	**7760**
18		Кировское	—	—	**10,0** 7,5—14,0	**45,0** 40,0—50,0	**46,0** 36,5—50,0	**3,1** 2,5—4,4	**0,6***	**62,5** 61,6—64,1	**5,3** 5,1—5,7	**1,1***	**3,5***	**0,9**	**26,7**	**6500** 5410—7170
19		Кривой Рог* . .	—	—	**9,0**	**55,0** 50,0—60,0	**23,0**	**5,5**	**0,4**	**69,8**	**6,2**	**6,6**		**0,9**	**16,5**	**5730** 5470—6140
20	Закавказье	Ткибульское . . .	—	—	**4,0** 2,4—6,6	**11,0** 6,5—18,0	**18,5** 12,0—28,0	**1,4** 0,8—1,7	**0,15** 0,1—0,2	**78,5** 77,1—80,4	**5,7** 5,3—6,0	**1,5**		**1,5**	**12,8**	**7300**
21		Ткварчельское* . .	—	—	**1,0**	**2,0**	**18,0**	**1,0**	—	**77,5**	**5,9**	**1,1**		**1,7**	**13,9**	**7780** 7500—7900
22	Урал	Кизеловское . . .	—	—	**1,2** 0,5—3,0	**5,5** 1,5—12,0	**22,7** 16,5—28,0	**6,3** 3,6—8,3	**0,2** 0,1—0,4	**80,3** 78,0—82,3	**5,6** 5,2—5,8	**5,1** 1,3—8,2	**2,8** 2,1—3,1	**1,3** 1,0—1,5	**4,9**	**7750**
23		Челябинское . . .	—	—	**9,0** 4,0—14,5	**19,0** 14,0—23,6	**19,2** 15,0—39,0	**1,2** 0,6—2,4	**0,05** 0,01—0,07	**73,6** 70,9—75,6	**5,2** 4,9—5,4	**0,8** 0,1—30	**0,7** 0,5—0,8	**1,8** 1,7—2,3	**17,9**	**8370** 7920—8500
24		Богословское . . .	—	—	**15,0** 13,5—18,0	**30,0** 25,0—36,0	**17,5** 14,1—21,0	**0,5** 0,4—0,7	**0,1** 0,05—0,1	**69,5** 68,6—70,4	**4,4** 4,2—4,9	**0,5**		**1,5**	**24,1**	**7150** 6680—7240
25		Егоршинское . . .	—	—	**1,2** 0,9—1,4	**5,9** 2,6—10,3	**19,0** 13,0—27,0	**0,5** 0,3—0,6	**0,1**	**91,3** 90,9—92,1	**3,5** 3,3—3,6	**0,5**		**0,6***	**4,1**	**6250** 6100—6500
26		Полтаво-Брединск.*	—	—	**3,0**	**4,0**	**23,0**	**0,9**	**0,02**	**93,4**	**1,7**	**0,3**	**0,8**	**0,8**	**3,0**	**8200** 8000—8390 **7900**

[1] Первое слагаемое — содержание золы без углекислоты карбонатов; второе — содержание углекислоты карбонатов (CO_2).
[2] Встречающаяся низкая температура плавления золы не характерна для подмосковного угля, обычно температура плавления > 1450°.
[3] В среднем для всех марок без штыба.
[4] Семеновское и Пантаевское.

Примечание. Звездочкой отмечены данные, приведенные на основании ограниченного количества анализов (см. текст).

Д. Б. Гинзбург. Вкл.

Элементы характеристики											Характеристика кокса	Сухая масса	Рабочая масса			Температура плавления золы в полувосстановительной среде		
$S^c_{пл}$	S^c_a	C^c	H^c	$S^c_к$	$S^c_{ор}$	N^c	O^c по разности	$Q^c_б$	$Q^c_в$	V^c		$Q^c_б$	A^p	$S^p_б$	$Q^p_н$	Начало деформации	Температура размягчения	Температура жидко-плавкого состояния
%	%	%	%	%	%	%	%	Калорий	Калорий	%		Калорий	%	%	Калорий	°С	°С	°С
Среднее от—до	Среднее от—до	Среднее от—до	Среднее от—до	Среднее от—до	Среднее от—до	Среднее от—до	Среднее	Среднее от—до	Среднее	Среднее от—до		Среднее	Среднее	Среднее	Средн. от—до	Среднее от—до	Среднее от—до	Среднее от—до
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
—	—	**51,0** 49,7—52,1	**6,15** 6,0—6,3	—	—	**0,6**	**42,25**	**4900** 4 700—5 050	**4890**	**85,0**	Слипшийся, рыхлый	**4850**	**0,7**	—	**2980**	—	—	—
—	—	**50,5** 49.7—51.1	**6,1** 6.0—6,2	—	—	**0,6**	**42,8**	**4800** 4 700—4 970	**4790**	**85,0**	То же	**4750**	**0,7**	—	**2910**	—	—	—
0,4 —2,0	**0,1**	**58,3** 53.4—61.5	**5,8** 5,2—6,2		**0,3**	**2,6** 2,3—3,3	**33,0**	**5650** 5 050—5 990	**5630**	**70,0** 67,5—75,0	Порошкообразный или слабо спекшийся	**5170**	**5,1**	**0,2**	**2680**	**800—1410**	**990—>1450**	**1060—**
0,9 5—1,5	**0,1**	**75,2** 70,8—79,0	**9,1** 8,5—9,6		**1,9**	**0,3***	**13,5**	**8100** 7430—8800	**8040**	**83,0**	Порошкообразный	**3360**	**39,3+10,5**	**0,8**	**2560**	**1110** 1060—1150	**1170** 1130—1200	**1190** 1140—1230
5,1 —7,2	**0,4** 0,2—1,0	**71,1** 68,7—73,7	**8,5** 8,1—9,4		**14,0**	**1,6***	**4,8**	**7860** 7460—8230	**7620**	**79,0** 73,0—84,0	То же	**2640**	**49,9+8,0**	**4,4**	**2010**	**1050** 1000—1090	**1090** 1020—1120	**1120** 1040—1170
,5	**0,4**	**68,2**	**8,7**		**10,5**	**1,5**	**11,1**	**7200**	**7000**	—	—	**2120**	**55,0+6,4**	**3,0**	**1590**	**990**	**1090**	**1140**
,7 —5,9 **7** 13,0	**0,2** 0,1—1,3 **0,3***	**69,7** 64,8—71,3 **68,5** 65,5 -73,0	**4,9** 4,4—5,4 **5,7** 5,2—6,3		**5,1** 1,8—3,4 **10,3**	**1,4** 0,9—1,7 **1,0***	**18,9** **14,5**	**6750** 5980—7100 **7230** 6900—7400	**6630** **6990**	**45,0** 40,0—51,0 **49,0** 44,0—54,0	То же »	**4940** **5200**	**18,2** **19,6**	**2,5** **5,4**	**2980** **3190**	**1010—>1450²**	**1160—** —	**1240—** —
1 -6,5	**0,2***	**89,5** 85,7—93,1	**1,1** 0,7—1,6		**5,0**	**1,4***	**3,0**	**7600** 7450—7760	**7480**	**5,0***	То же	**4560**	**37,4**	**2,9**	**4120**	**1080***	**1160***	**1300***
4 **9** **8** **7** 1,1	— **0,03** **0,03** **0,05** 0—0,2	**72,0** **71,5** **74,1** **85,6** 84,5—86,6	**5,0** **5,0** **5,4** **5,3** 5,1—5,5		**0,6** **1,5** **1,1** **0,7**	**1,6** **2,2** **19,4** **2,4** 2,2—2,7	**20,0** **19,8** **6,0**	**6670** **6670** **7000** **8440** 8270—8600	**6650** **6630** **6960** **8410**	**42,0** **41,0** **41,0** **29,0** 28,0—31,0	То же » Порошкообразный Спекшийся, сплавленный, плотный или вспуч.	**4410** **3990** **4810** **7440**	**26,9** **30,3** **24,7** **11,2**	**0,3** **0,7** **0,6** **0,7**	**3220** **2770** **3490** **6680**	**1170** **1100** **1100** **1130** 1100—1170	**1350** **1270** **1260** **1260** 1240—1300	**1400** **1330** **1300** **1320** 1260—135₀
,0	**0,2** 0,1—0,3	**77,3** 74,8—78,8	**5,4** 5,1—5,6		**3,8**	**1,6** 1,2—2,0	**11,9**	**7800** 7500—8050	**7700**	**44,0** 42,0—48,0	Порошкообразный или слипшийся	**6930**	**9,7**	**3,1**	**5640**	**1050** 1950—1260	**1150** 1040—1400	**1230** 1080—>1400
,0	**0,1** 0,1—0,3	**81,0** 78,5—82,7	**5,4** 5,0—5,5		**3,2**	**1,6** 0,9—1,8	**8,8**	**8100** 7860—8400	**8020**	**39,0** 35,0—44,0	Спекшийся, сплавленный, иногда вспученный	**7200**	**10,4**	**2,7**	**6430**	**1030** 940—1090	**1130** 1080 - 1170	**1200** 1160—1270
,9	**0,2** 0,1—0,5	**84,6** 82,4—87,0	**5,2** 4,8—5,5		**2,6**	**1,6** 1,4—1,8	**6,0**	**8470** 8220—8700	**8390**	**30,5** 26,0—35,0	Спекш., сплавл., плотн. или умеренно плотный	**7500**	**11,0**	**2,4**	**6940**	**1090** 970—>1400	**1170** 1080—	**1250** 1170—
,5	**0,1**	**87,0**	**4,9**		**2,1**	**1,6**	**4,4**	**8590** 8450—8700	**8530**	**22,0** 18,0—26,0	То же	**7680**	**10,3**	**1,9**	**7120**	**1030***	**1200***	**1300***
,0	**0,1**	**88,5** 87,1—91,2	**4,6** 4,1—5,1		**2,2**	**1,5** 1,3—1,6	**3,2**	**8590** 8410 - 8720	**8530**	**17,0** 12,0—18,0	»	**7760**	**9,4**	**2,0**	**7190**	**1100** 1080—1130	**1130** 1100—1180	**1180** 1150—1240
,5	**0,1** 0,03—0,1	**90,6** 89,4—92,4	**4,3** 4,0—4,6		**1,6**	**1,6** 1,3—1,9	**1,9**	**8620** 8500—8730	**8570**	**13,0** 17	Порошкообразный или слипшийся	**7890**	**8,2**	**1,4**	**7350**	**1070** 1020—1150	**1160** 1060—1220	**1210** 1130—1280
,5	**0,1**	**93,8** 91,3—96,1	**1,95** 1,4—2,8	**1,3** 0,1—6,0	**0,7** 0,5—1,0	**1,2**	**1,05**	**8200** 7970—8430	**8140**	**3,5** 1,2—6,0	Порошкообразный	**7400**	**9,2**	**1,8**	**6820**	**1040** 900—1100	**1120** 1000—1200	**1210** 1070—1320
,5	**0,15** 0,04—0,6	**93,2** 91,1—95,4	**1,85** 1,5—2,9	**1,3** 0,2—6,0	**0,7** 0,5—1,0	**1,2**	**1,75**	**8100** 7720 8310	**8040**	**4,0** 2,9—7,3	То же	**6700**	**16,0**	**1,7**	**6040**	**1120** 1020—1230	**1250** 1150—1370	**1360** 1230—1440
	0,3	**76,4**	**5,9**	**2,4**	**1,6**	**1,3**	**12,4**	**7760**	**7660**	**44,0**	Спекшийся, плотный	**4580**	**40,0**	**2,5**	**4210**	**1110**	**>1450**	—
,6 **,4**	**0,4** 0,2—0,6 **0,6*** **0,4**	**66,4** 64,5—68,0 **62,5** 61.6—64,1 **69,8**	**5,9** 5,0—6,2 **5,3** 5,1—5,7 **6,2**	**2,0** 0,0—6,0 **1,1*** **6,6**	**3,6** 3,2—4,0 **3,5***	**0,7** 0,6—0,8 **0,9** **0,9**	**21,4** **26,7** **16,5**	**6500** 5410—7170 **5730** 5470—6140 **7300**	**6390** **5600** **7120**	**56,5** 52,0—59,0 **55,5** **69,5**	Порошкообразный То же »	**4620** **3090** **56** **20**	**13,1** **25,3** **10,4**	**2,0** **1,7** **2,5**	**1590** **1310** **2030**	**1170** 1160—1180 **1280*** —	**1210** 1190—1250 **1350*** —	**1240** 1210—1290 **>1450*** —
,7	**0,15** 0,1—0,2 —	**78,5** 77,1—80,4 **77,5**	**5,7** 5,3—6,0 **5,9**		**1,5** **1,1**	**1,5** **1,7**	**12,8** **13,9**	**7780** 7500—7900 **7750**	**7730** **7720**	**41,0** 36,0—47,0 **37,0**	Слабоспекшийся или спекшийся, плотный Спекшийся, сплавлен.	**6340** **6360**	**16,5** **17,7**	**1,2** **0,9**	**5310** **5930**	**>1450** —	— —	— —
,3 **4**	**0,2** 0,1—0,4 **0,05** 0,01—0,07	**80,3** 78,0—82,3 **73,6** 70,9—75,6	**5,6** 5,2—5,8 **5,2** 4,9—5,4	**5,1** 1,3—8,2 **0,8** 0,1—30	**2,8** 2,1—3,1 **0,7** 0,5—0,8	**1,3** 1,0—1,5 **1,8** 1,7—2,3	**4,9** **17,9**	**8370** 7920—8500 **7150** 6680—7240	**8180** **7100**	**41,0** 34,5—43,0 **41,0** 37,5—44,0	Спекшийся, плотный, иногда сплавленный Порошкообразный	**6470** **5780**	**21,5** **15,6**	**6,0** **1,0**	**5720** **4350**	**1150** 990—>1400 **1030** 1000—1070	**1320** 1130—>145 **1130** 1080—1170	**1390** 1220— **1210** —1260
,7 **,6**	**0,1** 0,05—0,1 **0,1** **0,02**	**69,5** 68,6—70,4 **91,3** 90,9 92,1 **93,4**	**4,4** 4,2—4,9 **3,5** 3,3—3,6 **1,7**	**0,3**	**0,5** **0,5** **1,8**	**1,5** **0,6*** **0,8**	**24,1** **4,1** **3,0**	**6250** 6100—6500 **8200** 8000—8390 **7900**	**6230** **8180** **7870**	**43,0** 40,0—44,5 **8,0** 6,8—9,0 **3,0**	То же » »	**5160** **6640** **6080**	**12,3** **17,9** **22,1**	**0,3** **0,5** **0,9**	**3280** **6050** **5730**	**990** 980—1100 **>1400** **1390**	**1100** 1090—1120 — **>1450**	**1150** 30—1200 — —

слоты карбонатов (CO_2).
ычно температура плавления >1450°.

о количества анализов (см. текст).

Таблица 71 (продолжение)

Элементы характеристики											Сухая масса	Рабочая масса			Температура плавления золы в полувосстановительной среде		
	$C^г$	$H^г$	$S^г_к$	$S^г_{ор}$	$N^г$	$O^г$ по разности	$Q^г_б$	$Q^г_в$	$V^г$	Характеристика кокса	$Q^с_б$	$A^р$	$S^р_{об}$	$Q^р_н$	Начало деформации	Температура размягчения	Температура жидко-плавкого состояния
	%	%	%	%	%	%	Калорий	Калорий	%		Калорий	%	%	Калорий	°С	°С	°С
	Среднее от—до	Среднее от—до	Среднее от—до	Среднее от—до	Среднее от—до	Среднее	Среднее от—до	Среднее	Среднее от—до		Среднее	Среднее	Среднее	Средн. от—до	Среднее от—до	Среднее от—до	Среднее от—до
0)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
–	**85,3** 80,6—87,8	**5,2** 4,4—5,8	0,8		**1,4** 1,0—1,7	7,3	**8350** 8230—8680	**8320**	**29,0** 25,0—35,0	От порошкообразного до спекш., сплавл., плотн.	**6890**	**16,3**	**0,7**	**6120**	**>1450**	—	—
2	**78,5**	**6,4**	6,3		3,8		**8240**	**8080**	**46,0**	Спекшийся	**5520**	**32,4**	**4,3**	**5090**	—	—	—
5	**73,6**	**4,2**	**2,0**	**1,4**	**1,0***	**17,8**	**6970**	**6880**	**40,0**	Порошкообразный	**5820**	**12,8**	**2,6**	**4170**	**1020**	**1050**	**1110**
0,7	72,9—75,0	3,8—5,9	0,3—2,9	1,3—1,5			6680—7200		36,0—52,0						1000—1040	1040—1060	1060—1250
–	**91,2** 89,6—92,4	**4,3** 4,1—4,6		**0,5**	1,8 1,6—2,1	2,2	**8600** 8510—8720	**8580**	**15,5** 14,0—17,0	От слабоспекшегося до спекшегося, плотного	**7820**	**8,6**	**0,5**	**7280**	**1170** 1150—1200	**1370** 1250—>1450	**>1450** 1390—
–	**89,1** 86,8—91,0	**4,5** 4,1—4,9		**0,5**	**2,1** 1,6—2,5	**3,8**	**8400** 8200—8640	**8380**	**18,0** 15,0—24,0	От порошкообразн. до спекшегося, спл., плотн.	**7310**	**6,6**	**0,5**	**7090**	1120—1450	1240—>1450	1320—
–	**86,4** 85,0—88,0	**4,8** 4,2—5,5		**0,6**	**2,0** 1,7—2,4	**6,2**	**8200** 7950—8600	**8180**	**29,0** 21,0—34,0	От слипшегося до спекшегося, сплавл., плотн.	**7080**	**12,6**	**0,5**	**6240**	1060—1300	1130—1430	1240—1540
–	**83,5** 82,5—84,4	**5,8** 5,7—6,0		**0,5**	**2,7** 2,4—2,9	**7,5**	**8250** 8100—8430	**8220**	**41,0** 37,0—44,0	Спекшийся, сплавлен., умеренно-плотный	**7510**	**8,5**	**0,5**	**6720**	**1100** 1040—1140	**1170** 1160—1210	**1250** 1200—1260
–	**79,1** 78,9—79,4	**5,6** 5,4—5,8		**0,3**	**2,1** 1,9—2,2	**12,9**	**7650** 7450—7840	**7630**	**43,0** 40,0—45,0	От слипшегося до спекшегося, плотного	**6360**	**8,2**	**0,3**	**6010**			
05	**88,1**	**4,0**		**0,9**	**1,7**	**5,3**	**8300**	**8260**	**12,0**	Порошкообразный	**6980**	**14,6**	**0,7**	**6090**			
0,1	86,3—89,8	3,7—4,1			1,4—2,0		8170—8480		9,0—24,0						1000—1370	1270—1470	1300—1530
–	**86,3**	**5,5**		**0,5**	**2,4**	**5,3**	**8250** 8000—8450	**8230**	**29,0** 23,0—33,0	Спекшийся	**7590**	**7,4**	**0,5**	**6670**	—	—	—
1	**78,9**	**5,5**	**1,0**		**2,3**	**12,3**	**7800**	**7760**	**43,0**	От слабослипшегося	**6700**	**12,5**	**0,9**	**5640**	—	—	—
0,5	76,4—81,5	5,0—6,0			1,8—2,5		7610—8100		38,0—46,5	до спекшегося							
–	68,3—70,5	4,3—4,7	0,5—1,8		—	—	6180—6620	—	40,0—48,0	Порошкообразный	—	—	—	—	—	—	—
1	**77,9**	**5,8**	**1,4**		**1,6**	**13,3**	**7750**	**7700**	**45,0**	От слипшегося до спекшегося, плотного	**6510**	**14,4**	**1,2**	**5520**	**1010—>1500**	**1130—**	**1170—**
0,3	73,7—81,5	5,1—6,5			1,0—2,3		7200—7980		41,5—52,0								
1	**75,8**	**5,0**		**0,7**		**18,5**	**7200**	**7170**	**41,5**	Порошкообразный	**6580**	**5,8**	**0,5**	**4100**	—	—	—
	73,7—77,6	4,6—5,4					6800—7320		39,0—43,8								
–	**79,1**	**5,0**	**0,8**		**1,0**	**14,1**	**7760**	**7730**	**37,0**	От порошкообразного до спекшегося	**6900**	**10,0**	**0,8**	**5810**	—	—	—
	70,8—84,5	3,7—5,6	0,3—4,7		0,6—2,2		6980—8370		30,0—45,3								
–	**71,5**	**4,2**	**0,1**		**1,2**	**23,0**	**6610**	**6600**	**41,0**	Порошкообразный	**5740**	**10,0**	**0,2**	**4060**	—	—	—
	68,8—75,7	3,8—4,6	0,01—0,2				6500—6800		34,0—45,0								
–	**71,9**	**5,5**	**0,4**		**1,5**	**20,7**	**7050**	**7030**	**48,0**	То же	**6270**	**8,3**	**0,4**	**4300**	**1130**	**1200**	**1290**
	68,6—74,9	4,9—6,0	0,01—0,7		1,1—2,7		6510—7390		44,5—50,0						1120—1150	1180—1220	1230—1330
–	**86,7**	**4,9**	**0,3**		**1,**	**6,7**	**8400**	**8380**	**25,5**	Спекшийся, сплавленный, вспученный	**6840**	**17,9**	**0,4**	**6360**	—	—	—
	85,6—88,6	4,4—5,6	0,1—0,5		1,0—1,7		8260—8770		20,8—30,0								
–	**75,2**	**5,6**	**0,4**		**1,6**	**17,2**	**7300**	**7280**	**44,5**	Порошкообразный	**6820**	**9,4**	**0,4**	**5410**	—	—	—
	73,1—77,7	5,0—5,9	0,2—0,7				7100—7400		37,4—50,3								
–	**85,8**	**4,4**	**0,4**			**9,4**	**8250**	**8230**	**19,0**	Спекшийся, сплавленный, вспученный	**7160**	**12,6**	**0,4**	**6530**	—	—	—
	76,1—90,7	3,2—5,3	0,3—0,5						14,7—27,1								
–	**72,0**	**4,7**	**0,2**		**1,4**	**21,7**	**6700**	**6680**	**47,5**	Порошкообразный	**5540**	**13,2**	**0,4**	**3950**	—	—	—
	69,0—73,8	4,2—5,0	0,1—0,7		0,8—1,8				43,2—53,4								
4	**78,5**	**3,8**	**0,6**	**0,2**	**0,8**	**16,1**	**7070**	**7040**	**28,5**	То же	**6240**	**8,4**	**0,9**	**4680**	**1130**	**1240**	**1270**
0,7	77,2—79,8	3,4—4,2	0,2—1,3	0,1—0,4	0,7—1,0		6950—7170		24,0—32,5						1040—1290	1120—1360	1180—1370
3	**76,9**	**4,0**	**1,1**	**0,5**	**0,9**	**16,6**	**7010**	**6960**	**33,5**	»	**6060**	**10,3**	**1,3**	**4300**	**1050**	**1130**	**1170**
0,7	73,7—79,6	3,4—4,2	0,6—1,9	0,4—0,7	0,7—1,1		6540—7200		29,5—38,0						980—1220	1030—1260	1040—1290
1	**77,3**	**5,2**	**1,7**	**0,7**	**1,0**	**14,1**	**7550**	**7490**	**36,0**	Порошкообразный или слабослипшийся	**6010**	**17,6**	**1,7**	**4850**		**1140—**	**1310—**
0,1	75,0—78,1	4,9—5,3	0,1—2,5	0,4—1,0			7490—7640		34,0—38,0						1000—>1450		
2	**78,8**	**3,5**	**1,6**	**0,6**	**0,8**	**14,7**	**6950**	**6900**	**29,5**	Порошкообразный	**5990**	**10,4**	**1,5**	**4240**	**1120**	**1320**	**1350**
0,3	78,1—79,3	3,2—3,7	0,5—2,4	0,5—0,7	0,7—0,8		6900—7000		26,0—33,0						1030—1270	1290—1390	1300—1420
05	**79,8**	**4,9**	**0,5**			**13,6**	**7650**	**7620**	**35,0**	То же	**6980**	**7,8**	**0,4**	**5940**	**1110**	**1180**	**1260**
0,1	79,0—81,1	4,6—5,4	0,3—0,7		1,0—1,3		7560—7750		32,0—35,5						1010—1310	1040—1430	1110—>1450
1	**79,4**	**5,0**	**2,9**		**0,9**	**11,8**	**7550**	**7480**	**30,9**	»	**4040**	**41,8**	**1,4**	**3410**	**1260**	**>1450**	—
,25	**76,6**	**4,8**	**3,0**			**15,6**	**7416**	**7330**	**35,5**	Порошкообразный или слабослипшийся	**6280**	**13,8**	**2,5**	**5340**	**1120**	**1160**	**1270**
0,7	72,8—80,0	4,0—5,5					6700—7660		30,0—41,0						960—>1450	1030—	1050—
–	**86,6**	**13,0**	**0,1**		**0,3**		**10 830**	**10 810**	—	—	—	—	—	**9970**	—	—	—
	86,4—86,8	12,7—13,3	0,05—0,2				10730—10920										
–	**86,8**	**12,6**	**0,15**		**0,45**		**10 760**	**10 740**	—	—	—	—	—	**9740**	—	—	—
	86,3—87,1	12,3—13,1	0,0—0,35				10660—10860										
–	**51,7**	**5,9**	**0,2**		**0,9**	**41,3**	**4850**	**4830**	**76,0***	Порошкообразный	**4510**	**2,4**	**0,1**	**1040**	**780***	**1370***	**1400***
	50,0—53,5	5,6—6,3	0,03—0,8		0,6—1,0		4630—5070										
–	**51,0**	**5,9**	**0,1**		**42,0**		**4860**	**4850**	**80,0***	Слипшийся	**4750**	**1,9**	**0,1**	**3740**	—	—	—
	50,7—51,1	5,8—5,9	0,1—0,2				4850—4890										
–	**51,0**	**6,1**	**0,1**		**42,8**		**4890**	**4880**	**83,0**	То же	**4730**	**2,8**	**0,1**	**3850**	**1120***	**1170***	**1200***
	50,3—51,8	6,0—6,3	0,04—0,15				4830—4980										
–	**50,3**	**6,1**	**0,1**		0,7	**42,8**	**4790**	**4780**	**80,0**	Порошкообразный	**3810**	**18,5**	**0,1**	**3130**	—	—	—
	49,8—50,6	6,0—6,2					4720—4830										
–	**50,5**	**6,2**	**0,1**		**43,2**		**4750**	**4740**	—	—	**4530**	**4,2**	**0,1**	**3690**	**820**	**860**	**950**

ичества анализов (см. текст.)

R 123/39

№ по порядку	Район месторождения	Наименование месторождения	Пласт, марка, сорт и пр.	Условное обозначение марки	Элементы характеристики: $W^л$ % Среднее от—до	$W^р$ % Среднее от—до	$A^с$ % Среднее от—до	$S^с_{об}$ % Среднее от—до	$S^с_а$ % Среднее от—до	$C^г$ % Среднее от—до	$H^г$ % Среднее от—до	$S^г_к$ % Среднее от—до	$S^г_{ор}$ % Среднее от—до	$N^г$ % Среднее от—до	$O^г$ по разности % Среднее	$Q^г_б$ Калорий Среднее от—до	$Q^г_в$ Калорий Среднее	$V^г$ % Средн от—д
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
27	Казахстан	Карагандинское	Пласты, Нов. Верх. Мариана Ниж. Мар.	—	2,1 1,0—2,5	7,0 3,1—12,0	17,5 6,0—30,5	0,8 0,4—1,3	—	85,3 80,6—87,8	5,2 4,4—5,8	0,8		1,4 1,0—1,7	7,3	8350 8230—8680	8320	29, 25,0—3
28		Берчогурское*	—	—	1,5	1,7	33,0	4,4	0,2	78,5	6,4	6,3		3,8		8240	8080	46,0
29		Ленгеровское	—	—	11,0 7,5—12,3	22,5 13,5—28,7	16,5 11,4—20,7	3,3 1,5—4,1	0,5 0,1—0,7	73,6 72,9—75,0	4,2 3,8—5,9	2,0 0,3—2,9	1,4 1,3—1,5	1,0*	17,8	6970 6680—7200	6880	40,0 36,0—5
30	Кузнецкий бассейн	Анжеро-Судженские копи	—	—	0,6 0,4—0,7	4,0 2,0—6,4	9,0 7,0—14,6	0,5 0,4—1,0	—	91,2 89,6—92,4	4,3 4,1—4,6	0,5		1,8 1,6—2,1	2,2	8600 8510—8720	8580	15,5 14,0—1
31		Прокопьевские копи	—	—	1,0 0,5—1,2	6,0 2,0—9,0	7,0 2,5—12,0	0,5 0,3—0,7	—	89,1 86,8—91,0	4,5 4,1—4,9	0,5		2,1 1,6—2,5	3,8	8400 8200—8640	8380	18, 15,0—2
32		Кемеровские копи	—	—	1,0 0,7—1,4	8,1 4,0—11,3	13,7 3,0—19,0	0,5 0,3—1,0	—	86,4 85,0—88,0	4,8 4,2—5,5	0,6		2,0 1,7—2,4	6,2	8200 7950—8600	8180	29, 21,0—3
33		Ленинские копи	Коксовый	—	1,8 1,5—2,5	6,0 3,0—8,0	9,0 3,0—13,0	0,5 0,4—0,9	—	83,5 82,5—84,4	5,8 5,7—6,0	0,5		2,7 2,4—2,9	7,5	8250 8100—8430	8220	41,0 37,0—4
34		» »	Энергет.	—	3,5 3,2—4,0	9,0 8,0—14,0	9,0 6,0—14,0	0,3 0,2—0,6	—	79,1 78,9—79,4	5,6 5,4—5,8	0,3		2,1 1,9—2,2	12,9	7650 7450—7840	7630	43,0 40,0—4
35		Араличевские копи	—	—	2,4 1,3—3,0	9,0 3,5—12,0	16,0 13,1—26,4	0,8 0,3—1,4	0,05 0,03—0,1	88,1 86,3—89,8	4,0 3,7—4,1	0,9		1,7 1,4—2,0	5,3	8300 8170—8480	8260	12,0 9,0—24
36		Осиновские копи	—	—	—	8,0 7,0—12,0	8,0 6,5—12,1	0,5 0,4—0,7	—	86,3	5,5	0,5		2,4	5,3	8250 8000—8450	8230	29,0 23,0—3
37	Западная Сибирь	Хакасское[5] (Черногорские копи)	—	—	3,5 2,8—4,7	11,0 10,4—13,5	14,0 3,5—27,8	1,0 0,5—4,2	0,1 0,05—0,5	78,9 76,4—81,5	5,5 5,0—6,0	1,0		2,3 1,8—2,5	12,3	7800 7610—8100	7760	43, 38,0—4
38		Канское*	—	—	10,0	10,0—28,2	3,7—7,7	0,5—1,6	—	68,3—70,5	4,3—4,7	0,5—1,8		—	—	6180—6620	—	40,0—4
39	Восточная Сибирь	Черемховское	—	—	3,7 2,4—8,0	10,0 5,0—17,0	16,0 4,8—33,0	1,3 0,5—3,1	0,1 0,05—0,3	77,9 73,7—81,5	5,8 5,1—6,5	1,4		1,6 1,0—2,3	13,3	7750 7200—7980	7700	45,0 41,5—5
40		Черновское	—	—	11,3 8,5—14,6	32,0 25,8—37,0	8,5 5,0—13,4	0,7 0,5—0,9	0,1	75,8 73,7—77,6	5,0 4,6—5,4	0,7		18,5		7200 6800—7320	7170	41,5 39,0—4
41	Дальневосточный край	Букачачинское	—	—	3,8 1,1—9,4	11,1 3,4—24,9	11,1 1,6—36,0	0,9 0,4—5,2	—	79,1 70,8—84,5	5,0 3,7—5,6	0,8 0,3—4,7		1,0 0,6—2,2	14,1	7760 6980—8370	7730	37,0 30,0—45
42		Кивдинское	—	—	10,6 7,7—21,7	24,0 17,2—40,0	13,1 7,0—21,0	0,2 0,1—0,4	—	71,5 68,8—75,7	4,2 3,8—4,6	0,1 0,01—0,2		1,2	23,0	6610 6500—6800	6600	41,0 34,0—45
43		Артемовское	—	—	11,3 5,9—18,4	25,6 18,9—32,3	11,1 6,2—34,7	0,5 0,3—0,9	—	71,9 68,6—74,9	5,5 4,9—6,0	0,4 0,01—0,7		1,5 1,1—2,7	20,7	7050 6510—7390	7030	48,0 44,5—50
44		Сучанское	—	—	1,2 0,3—2,0	3,5 1,1—5,5	18,5 12,3—27,0	0,4 0,3—0,5	—	86,7 85,6—88,6	4,9 4,4—5,6	0,3 0,1—0,5		1, 1,0—1,7	6,7	8400 8260—8770	8380	25,5 20,8—30
45		Тавричанское	—	—	8,5 4,0—12,8	12,0 8,4—17,7	10,[illegible] 5,3—32,2	0,5 0,1—1,1	—	75,2 73,1—77,7	5,6 5,0—5,9	0,4 0,2—0,7		1,6	17,2	7300 7100—7400	7280	44,5 37,4—50
46	Сахалин	Октябрьское	—	—	1,7 0,4—5,4	5,3 0,9—15,4	13,3 2,6—51,2	0,4 0,3—0,8	—	85,8 76,1—90,7	4,4 3,2—5,3	0,4 0,3—0,5		9,4		8250	8230	19,0 14,7—27
47	Камчатка	Корфовское	—	—	12,7 6,7—17,8	23,2 17,1—25,5	17,2 [illegible],8—59,2	0,5 0,2—1,0	—	72,0 69,0—73,8	4,7 4,2—5,0	0,2 0,1—0,7		1,4 0,8—1,8	21,7	6700	6680	47,5 43,2—53
48	Средняя Азия	Сулюкта	—	—	11,2 9,2—13,9	20,3 15,4—25,5	11,8 7,0—17,1	1,1 0,5—1,9	0,4 0,2—0,7	78,5 77,2—79,8	3,8 3,4—4,2	0,6 0,2—1,3	0,2 0,1—0,4	0,8 0,7—1,0	16,1	7070 6950—7170	7040	28,5 24,0—32,
49		Кизил-Кия	—	—	11,2 8,3—16,0	23,8 14,4—32,8	13,5 8,9—20,1	1,7 1,3—2,5	0,3 0,1—0,7	76,9 73,7—79,6	4,0 3,4—4,2	1,1 0,6—1,9	0,5 0,4—0,7	0,9 0,7—1,1	16,6	7010 6540—7200	6960	33,5 29,5—38,
50		Кок-Янгак	—	—	5,5 4,2—8	[illegible]	20,4 [illegible]2—25,6	2,0 1,6—2,6	0,1 0,05—0,1	77,3 75,9—78,1	5,2 4,9—5,3	1,7 0,1—2,5	0,7 0,4—1,0	1,0	14,1	7550 7490—7640	7490	36,0 34,0—38
51		Шураб	—	—	9,[illegible]	[illegible]	[illegible]	2,0 [illegible]—2,8	0,2 0,1—0,3	78,8 78,1—79,3	3,5 3,2—3,7	1,6 0,5—2,4	0,6 0,5—0,7	0,8 0,7—0,8	14,7	6950 6900—7000	6900	29,5 26,0—33,
52		Нарым	—	—	5,5 4,5—6,1	6,7—[illegible]	[illegible]спе[illegible]ийс[illegible]ийся	0,5 0,3—0,6	0,05 0,02—0,1	79,8 79,0—81,1	4,9 4,6—5,4	0,5 0,3—0,7		[illegible] 1,0—[illegible],3	13,6	7650 7560—7750	7620	35,0 32,0—35,
53		Ханака	—	—	1,5	10,1	[illegible],5	1,6	0,1	79,4	5,0	2,9		0,9	11,8	7550	7480	30,0
54		Кштут-Зауранское	—	—	5,6 4,3—8,0	9,9 7,0—20,2	15,3 4,7—41,7	2,8 0,8—7,3	0,25 0,05—0,7	76,6 72,8—80,0	4,8 4,0—5,5	3,0		15,6		7416 6700—7660	7330	35,5 30,0—41,
	Д. Жидкое топливо[6]																	
1		Моторное топливо (тяжелое)	—	—	—	1,3 0,0—7,3	—	—	—	86,6 86,4—86,8	13,0 12,7—13,3	0,1 0,05—0,2		0,3		10 830 10730—10920	10 810	—
2		Мазут	—	—	—	3,0 0,0—9,8	—	—	—	86,8 86,3—87,1	12,6 12,3—13,1	0,15 0,0—0,35		0,45		10 760 10660—10860	10 740	—
	Е. Су[illegible]гаты топлива:																	
		Отдубина	—	—	9,0 5,8—1,34	65,8 47,7—76,2	7,1 2,8—11,9	0,2 0,03—0,7	—	51,7 50,0—53,5	5,9 5,6—6,3	0,2 0,03—0,8		0,9 0,6—1,0	41,3	4850 4630—5070	4830	76,0*
		Лузга подсолнуха	—	—	6,0 4,4—8,2	3,8 9,2—17,4	2,2 1,9—2,8	0,1 0,1—0,2	—	51,0 50,7—51,1	5,9 5,8—5,9	0,1 0,1—0,2		43,0		4860 4850—4890	4850	80,0*
		Костра льняная	—	—	7,5 6,8—8,6	11,1 7,5—13,4	3,2 [illegible]—5,3	0,1 0,04—0,15	—	51,0 50,3—51,8	6,1 6,0—6,3	0,1 0,04—0,15		42,8		4890 48[illegible]0—4980	4880	83,0
		Рисовая шелуха	—	—	7,2 6,5—8,1	9,8 7,7—11,1	20,5 2[illegible]—20,8	0,1	—	50,3 49,8—50,6	6,1 6,0—6,2	0,1		0,7	42,8	4790 472[illegible]0—4830	4780	80,0
		Солома *	—	—	—	10,5	4,7	0,1	—	50,5	6,2	0,1		43,2		4750	4740	—

[5] Оно же Минусинское.
[6] Бакинское, Грозненское и Эмбенское.
Примечание. Звездочкой отмечены данные, приведенные на основании ограниченного количества анализов (см. текст.)